

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Estudo do sistema energético para adega autossuficiente (Açores)

Jorge Manuel Nunes Mourato Colaço

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Guilherme Carrilho da Graça
Nuno Mateus

Resumo

Na União Europeia, o setor dos edifícios é responsável por 40% do consumo de energia final, tornando-o num dos principais alvos de medidas que incentivem a redução dos seus níveis de consumo. Neste contexto, a simulação dinâmica possui um papel preponderante, permitindo a otimização dos sistemas energéticos dos edifícios durante a sua fase de projeto, conduzindo assim a uma redução dos seus consumos energéticos.

O presente trabalho consiste no estudo de um sistema energético para uma adega autossustentável nos Açores. Para que seja possível o dimensionamento do sistema energético, o consumo de energia elétrica do edifício é estimado com recurso ao *software EnergyPlus*. O dimensionamento do sistema energético é realizado através do programa *HomerPro*. Posteriormente, é feito um estudo de aplicação de medidas que permitem a redução dos consumos de energia elétrica, recorrendo ao *software EnergyPlus*, e o seu impacto na dimensão e no custo total do sistema.

Para o edifício em estudo foi possível verificar que a solução economicamente vantajosa para suprir todos os seus consumos de energia elétrica é um sistema energético *off-grid* composto por geradores a *diesel* (116 kW), painéis solares fotovoltaicos (151.6 kW), baterias de ião-lítio (287 kWh) e inversores (41.5 kW), que apresenta um custo total de 604 mil €.

Palavras-chave: Simulação dinâmica, *EnergyPlus*, *HomerPro*, Medidas de redução dos consumos energéticos

Abstract

In the European Union, the buildings' sector is responsible for 40% of final energy consumption, making it one of the main targets for measures that encourages the reduction of its consumption levels. In this context, dynamic simulation plays a preponderant role, allowing the optimization of the building's energy systems during the project phase, leading to a reduction of its energy consumption.

The present work consists in the study of an energy system for a self-sustainable winery in the Azores. In order to make the sizing of the energy system possible, the building's electric energy consumption is estimated using the EnergyPlus software. The sizing of the energy system is carried out through the HomerPro program. Subsequently, through the EnergyPlus software is conducted a study of the implementation of electrical energy consumption reduction measures and their impact in the dimension and the total cost of the energy system.

For the building under study it was possible to verify that the economically advantageous solution to supply all its electric energy consumption is an off-grid energy system composed by diesel generators (116 kW), photovoltaic panels (151.6 kW), li-ion batteries (287 kWh) and inverters (41.5 kW), which has a total cost of 604 thousand €.

Keywords: Dynamic simulation, EnergyPlus, HomerPro, Energy consumption reduction measures

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos	3
2. Fundamentos teóricos.....	4
2.1. Transferência de calor em edifícios.....	4
2.1.1. Mecanismos de transferência de calor.....	5
2.1.2. Balanço Térmico	7
2.2. Simulação dinâmica computacional – <i>EnergyPlus</i>	9
2.3. Sistemas energéticos <i>off-grid</i>	11
2.3.1. Configurações dos sistemas energéticos	11
2.3.2. Estudos de sistemas energéticos <i>off-grid</i> existentes	14
2.4. Modelação do sistema energético – <i>HomerPro</i>	15
3. Caso de estudo.....	17
3.1. Localização.....	17
3.2. Descrição do edifício.....	19
4. Previsão do consumo energético do edifício	23
4.1. Parâmetros de simulação.....	23
4.2. Resultados obtidos.....	27
4.3. Aplicação de medidas de redução do consumo de energia	29
5. Dimensionamento do sistema energético	33
5.1. Configuração do sistema energético.....	33
5.2. Cenários analisados	36
5.3. Resultados Obtidos.....	38
5.3.1. Influência da estratégia de modelação da carga no sistema energético.....	43
5.3.2. Impacto das medidas de redução dos consumos energéticos na dimensão do sistema	46
6. Conclusão.....	48
7. Bibliografia.....	49
Anexo I – Alçados e cortes do edifício em estudo	51

Índice de figuras

1.1	Percentagem de energia final consumida por setor na União Europeia [3].....	1
2.1	Mecanismos de transferência de calor em edifícios.	4
2.2	Parâmetros que influenciam o balanço térmico de um edifício, adaptado de [6].....	7
2.3	Processo de simulação através do <i>software EnergyPlus</i> , adaptado de [7]	10
2.4	Esquema da configuração DC de um sistema energético <i>off-grid</i> , adaptado de [11].....	12
2.5	Esquema da configuração AC de um sistema energético <i>off-grid</i> , adaptado de [11].....	12
2.6	Esquema da configuração híbrida de um sistema energético <i>off-grid</i> , adaptado de [11]	13
3.1	Localização do edifício em estudo, adaptado de <i>Google Earth</i>	17
3.2	Temperatura média, mínima e máxima mensal do clima da vila Madalena na Ilha do Pico, Açores.	18
3.3	Radiação difusa e direta média mensal da vila Madalena na Ilha do Pico, Açores.....	18
3.4	Modelo 3D do edifício em estudo.	19
3.5	Modelo 3D do edifício em estudo.	20
3.6	Divisão da planta do edifício em estudo nas suas três zonas principais.....	20
4.1	Divisão da planta do edifício em estudo nas suas três zonas principais.....	23
4.2	Perfis de ocupação das diferentes divisões do edifício em estudo.	25
4.3	Perfis de utilização dos equipamentos elétricos das diferentes divisões do edifício em estudo....	26
4.4	Distribuição percentual dos diferentes consumos de energia elétrica do edifício (esquerda) e respetivos valores dos consumos do sistema de climatização do edifício (direita).	28
4.5	Consumo mensal de energia elétrica referente ao arrefecimento do edifício (barras azuis) e temperatura exterior média mensal da vila Madalena (linha cinzenta).	29
4.6	Ilustração do esquema de abertura das janelas do edifício em estudo.....	30
4.7	Consumo anual de energia elétrica referente ao arrefecimento do edifício consoante os diferentes cenários de medidas de redução dos consumos energéticos estudadas.	31
4.8	Distribuição percentual dos diferentes consumos de energia elétrica do edifício após a aplicação das medidas de redução dos consumos energéticos (esquerda) e respetivos valores dos consumos de climatização do edifício (direita).....	32

5.1	Configuração do sistema energético do edifício em estudo.	34
5.2	Modelo 3D do edifício em estudo com a instalação de painéis solares fotovoltaicos na sua cobertura e no seu parque de estacionamento.	35
5.3	Perfis de consumo necessários suprir com o sistema energético híbrido dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento, obtidos através <i>software HomerPro</i> :.....	36
5.4	Perfis de consumo necessários suprir com o sistema energético híbrido dimensionado através do segundo critério de dimensionamento, obtidos através <i>software HomerPro</i> :	37
5.5	Esquema dos critérios de dimensionamento utilizados e respetivos cenários analisados	38
5.6	Custo dos componentes do sistema dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento para o primeiro cenário analisado.	40
5.7	Custos dos componentes do sistema dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para o primeiro cenário analisado.	41
5.8	Diferentes custos do sistema energético dimensionado através de ambos os critérios para o primeiro cenário analisado.	42
A.1	Alçado Norte do edifício em estudo.	51
A.2	Alçado Sul do edifício em estudo.....	51
A.3	Alçado Nascente do edifício em estudo.	51
A.4	Alçado Poente do edifício em estudo.	51
A.5	Corte número 1 do edifício em estudo.....	52
A.6	Corte número 2 do edifício em estudo.....	52
A.7	Corte número 3 do edifício em estudo.....	52
A.8	Corte número 4 do edifício em estudo.....	52
A.9	Corte número 5 do edifício em estudo.....	53
A.10	Corte número 6 do edifício em estudo.....	53

Índice de tabelas

3.1	Soluções construtivas do edifício em estudo apresentadas do interior para o exterior.....	22
4.1	Período de ocupação e número de ocupantes das diferentes divisões do edifício em estudo	24
4.2	Potência dos equipamentos elétricos instalados nas diferentes divisões e o seu respetivo período de utilização	26
4.3	Ganhos de calor sensível provenientes da utilização dos equipamentos de cozinha.....	26
4.4	Dados necessários para o cálculo do COP dinâmico da bomba de calor utilizada no sistema de climatização	27
5.1	Diferentes custos e respetivo tempo de vida útil dos componentes utilizados para o dimensionamento do sistema energético do edifício em estudo.....	39
5.2	Capacidade instalada dos componentes do sistema energético dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento e respetivos custos dos cenários analisados	40
5.3	Capacidade instalada dos componentes do sistema energético dimensionado através do segundo critério de dimensionamento e respetivos custos dos cenários analisados	41
5.4	Capacidade instalada dos componentes e respetivos custos do sistema energético dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para ambas as estratégias de modelação da carga	44
5.5	Capacidade instalada dos componentes e respetivos custos do sistema energético dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento para ambas as estratégias de modelação da carga	45
5.6	Capacidade instalada dos componentes e respetivos custos do sistema energético dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para suprir os consumos energéticos do edifício antes e após a aplicação de medidas de redução dos mesmos	47

Lista de abreviaturas

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
DC	Corrente contínua
AC	Corrente alternada
NREL	Laboratório Nacional de Energia Renováveis (Estados Unidos da América)
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
SCE	Sistema Nacional de Certificação de Edifícios
XPS	Poliestireno extrudido
RPH	Renovações por hora
COP	Coeficiente de performance
AQS	Águas Quentes Sanitárias
VN	Ventilação Natural
AN	Arrefecimento Noturno

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com o aumento do aquecimento global sentido nas últimas décadas tem-se registado uma maior preocupação para com a poluição e o aumento da emissão de gases de efeito estufa. O fator com um papel mais preponderante neste fenómeno é a queima de combustíveis fósseis, nomeadamente para a geração de energia [1]. Tal facto deve-se ao crescimento do consumo de energia que se tem registado nos últimos anos, conduzindo a um maior consumo de combustíveis fósseis por parte das centrais energéticas convencionais e, conseqüentemente, a um aumento das emissões de gases de efeito estufa. Neste âmbito é necessário implementar medidas que permitam não só uma mudança do paradigma energético atual, como também incentivem a redução dos consumos energéticos.

Atualmente, segundo dados da União Europeia, o setor dos edifícios é responsável por aproximadamente 40% do consumo de energia final [2]. Tais dados podem ser observados através da Figura 1.1, tendo em conta que o setor dos edifícios resulta da junção entre o setor residencial e o de serviços [3]. Através destes dados é possível verificar que este setor é o que apresenta maiores níveis de consumo de energia final, pelo que este deve ser um dos principais alvos de medidas que incentivem a sua redução.

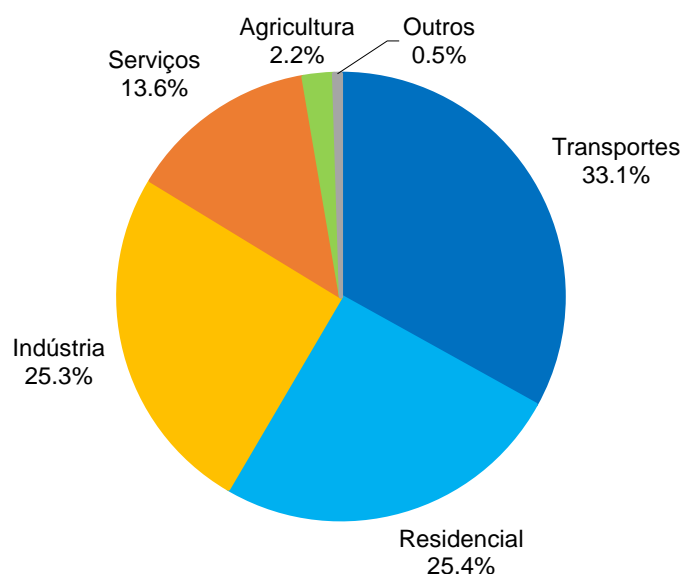


Figura 1.1 – Percentagem de energia final consumida por setor na União Europeia [3].

Devido aos seus sistemas energéticos, os edifícios podem possuir condições interiores completamente distintas do clima exterior, nomeadamente nos níveis de iluminação ou nos valores de temperatura. No entanto, esta possibilidade de modular o ambiente interior dos edifícios leva a um aumento do consumo de energia elétrica dos mesmos. Por esta razão, os sistemas energéticos dos edifícios devem ser eficientes e corretamente dimensionados de forma a permitir uma redução dos consumos energéticos deste setor.

Para que seja possível um dimensionamento correto dos sistemas energéticos do edifício é necessário optar pelas melhores decisões em relação às características e às soluções construtivas do mesmo. Neste contexto, a fase de projeto dos edifícios reveste-se de extrema importância, sendo esta a fase em que são

tomadas todas as decisões em relação ao edifício, que irão influenciar o seu comportamento em termos energéticos e em termos térmicos. Assim, nesta fase é necessário recorrer a ferramentas de simulação que permitam analisar quais as melhores soluções para o edifício, permitindo que este possua o menor consumo energético possível e garanta o bem-estar dos seus ocupantes.

Através das ferramentas de simulação é possível obter modelos que correspondam aos edifícios que se encontram em fase de projeto, onde são inseridas todas as principais características e soluções construtivas utilizadas no edifício, caracterizando-o assim de uma forma fidedigna. Estes modelos permitem fazer o balanço térmico do edifício e analisar diferentes parâmetros do edifício, como por exemplo os seus consumos energéticos. Com estas possibilidades garantidas, é possível analisar diferentes opções para o edifício, permitindo uma otimização dos seus sistemas energéticos de uma forma rápida e eficaz, sem comprometer os níveis de conforto interior.

Assim, a presente dissertação visa estimar os consumos de energia elétrica de uma adega localizada na Ilha do Pico. Esta avaliação será realizada através de ferramentas de simulação dinâmica com o intuito de otimizar os sistemas energéticos do edifício, sem comprometer os níveis de conforto dos ocupantes. Serão ainda estudadas medidas que permitam a redução dos consumos de energia elétrica do edifício, de modo a tornar o edifício o mais eficiente possível.

Tendo em conta que o local de estudo não possui ligação à rede elétrica nacional, será também feito um estudo da solução economicamente favorável ao edifício que permita suprir todos os seus consumos energéticos, mantendo assim o seu bom funcionamento. Esta solução pode passar pela instalação de um sistema energético híbrido *off-grid*, ou pela ligação à rede elétrica nacional.

No capítulo seguinte, será feito um resumo dos fundamentos teóricos de transferência de calor em edifícios, sistemas energéticos *off-grid* e ferramentas de simulação. Seguidamente, será apresentado o caso de estudo desta dissertação. Após esta apresentação, será feita a previsão dos consumos de energia elétrica do edifício e estudada a aplicação de medidas que permitam a redução destes mesmos consumos. Finalmente, será feito o dimensionamento do sistema energético *off-grid* para o edifício em estudo.

1.2. Motivação

Esta dissertação tem como base o projeto de um novo edifício que irá possuir uma adega, um espaço dedicado ao turismo rural e um restaurante que servirá também como espaço para eventos relacionados com as atividades do mesmo. O local onde será construído é caracterizado por não possuir qualquer ligação à rede elétrica nacional, pelo que é necessário determinar uma solução que permita suprir todos os seus consumos energéticos. Neste contexto, é necessário prever quais os valores de consumos de energia elétrica do edifício em estudo, sendo estes posteriormente utilizados na determinação da solução economicamente favorável para o sistema energético do mesmo.

Este estudo é também, de certa forma, inovador. A maioria dos estudos de dimensionamento de sistemas energéticos híbridos são realizados para localidades remotas, onde já são conhecidos os valores de consumo destas mesmas. No entanto, neste estudo, como o edifício em análise ainda não foi construído, não existe qualquer valor de referência para o seu consumo. Por este motivo, serão realizadas simulações dinâmicas do edifício, com recurso ao programa *EnergyPlus*, de forma a obter os seus consumos de energia elétrica e torná-lo o mais eficiente possível. Posteriormente, através da utilização do programa *HomerPro*, serão analisadas diferentes soluções que permitam suprir os consumos de energia elétrica do edifício, com o intuito de obter o cenário economicamente favorável ao edifício.

1.3. Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo a determinação da solução economicamente favorável ao edifício que permita suprir todos os seus consumos de energia elétrica. Para atingir este objetivo, será efetuada uma análise económica num período de tempo correspondente a 25 anos de duas soluções distintas: a instalação de um sistema energético *off-grid* ou a ligação à rede elétrica nacional.

Após esta análise económica, será também realizado um estudo de otimização dos consumos de energia elétrica do edifício. Para esta otimização, serão analisadas medidas de redução dos consumos energéticos e o seu impacto na dimensão do sistema energético *off-grid*.

2. Fundamentos teóricos

Para que seja possível analisar o conforto térmico dos ocupantes de um dado edifício é necessário conhecer quais os diferentes mecanismos que regem a transferência de calor nos edifícios. Além disso, é também necessário perceber qual o impacto que cada um dos mecanismos apresenta no balanço térmico de um edifício. Com estes princípios bem definidos, é possível caracterizar de forma detalhada o comportamento térmico do edifício, permitindo uma otimização dos seus sistemas energéticos e uma consequente redução do seu consumo de energia elétrica.

Além dos princípios de transferência de calor em edifícios e da forma como estes influenciam o balanço térmico dos mesmos, é também necessário estudar quais as configurações de sistemas energéticos *off-grid* existentes. Neste contexto, a revisão bibliográfica de estudos de sistemas energéticos *off-grid* existentes revela-se de elevada importância, permitindo uma análise de diferentes estratégias e configurações que podem ser utilizadas e, consequentemente, a obtenção de um sistema energético com um custo total mais reduzido.

2.1. Transferência de calor em edifícios

Segundo as leis da termodinâmica, a transferência de calor ocorre entre dois sistemas que se encontram em contacto térmico se estes possuírem temperaturas diferentes. A energia térmica é transferida do sistema com temperatura mais elevada para o sistema com um menor valor de temperatura, até que seja atingido o equilíbrio térmico entre os sistemas, ou seja, até que a temperatura dos dois sistemas seja a mesma [4].

A transferência de energia sob a forma de calor pode ser realizada através de três diferentes mecanismos: condução, convecção e radiação (Figura 2.1):

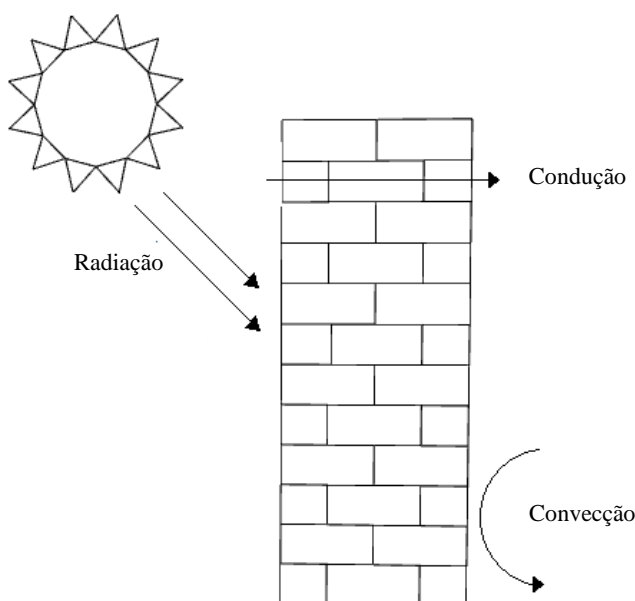


Figura 2.1 – Mecanismos de transferência de calor em edifícios.

2.1.1. Mecanismos de transferência de calor

Condução

A condução térmica é um mecanismo de transferência de calor que ocorre ao nível dos átomos e das moléculas de um material, sendo este causado por uma diferença de temperatura num corpo. As moléculas presentes na região de maior temperatura apresentam uma maior energia interna e, através de interações com as moléculas adjacentes, transferem parte da sua energia para estas, que possuem menor energia interna [5].

O fluxo de calor transferido por condução é caracterizado pela Lei de Fourier, traduzida pela seguinte expressão:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Onde:

q = fluxo de calor por unidade de área (W/m^2)

λ = condutibilidade térmica do material ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura ($^\circ\text{C/m}$)

De notar que o sinal negativo na equação (2.1) indica que a transferência de calor é dada no sentido de decréscimo de temperatura. O fluxo de calor apenas é positivo no sentido em que o gradiente de temperatura é negativo.

Convecção

A convecção é o mecanismo de transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando estes se encontram a temperaturas diferentes. Assim sendo, para além da transferência de energia por movimentação molecular, este mecanismo também permite uma transferência de energia através do movimento do fluido [5].

A transferência de calor por convecção pode ser realizada através de dois diferentes mecanismos: convecção forçada ou convecção natural. Num regime de convecção forçada, o escoamento é gerado por agentes externos, tais como ventiladores ou o próprio vento. Por outro lado, num regime de convecção natural, o escoamento é induzido por diferenças de pressão causadas por gradientes térmicos no fluido [5].

O fluxo de calor transferido por convecção é traduzido pela Lei de Newton do arrefecimento através da equação (2.2):

$$q = h_c (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Onde:

q = fluxo de calor por unidade de área (W/m^2)

h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)

T_s = Temperatura da superfície ($^\circ\text{C}$)

T_∞ = Temperatura do fluido ($^\circ\text{C}$)

A equação (2.2) é válida para o cálculo do fluxo de calor transferido para ambos os mecanismos de convecção descritos anteriormente. A diferença entre os dois mecanismos é o valor do coeficiente de transferência de calor, havendo diferentes expressões para o seu cálculo consoante o regime de convecção. Tendo em conta que o fluxo de calor transferido por convecção é proporcional à velocidade do escoamento, é possível atingir um maior valor de transferência de calor através de convecção forçada.

Radiação

Para que seja possível a transferência de calor por radiação, ao contrário dos dois mecanismos descritos anteriormente, não é necessário a presença de um meio material para que ocorra, sendo esta mais eficiente no vácuo. Neste mecanismo, a energia térmica é transportada através de fotões, ou ondas eletromagnéticas, provenientes de alterações nas configurações eletrónicas dos átomos e moléculas constituintes de um corpo [5].

Para que seja possível a emissão de radiação por parte de um corpo é necessário que este apresente uma temperatura diferente do zero absoluto (0 K). Quando a radiação emitida por um corpo atinge uma dada superfície, esta é parcialmente refletida, transmitida e absorvida, sendo esta última a que contribui para o aumento de temperatura da superfície.

O fluxo de calor transferido por radiação entre dois corpos está relacionado com a Lei de Stefan-Boltzmann e pode ser traduzido através da seguinte expressão:

$$q_{(1,2)} = h_r (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

Onde:

$q_{(1,2)}$ = fluxo de calor do corpo 1 para o 2 por unidade de área (W/m^2)

h_r = coeficiente de transferência de calor radiativo ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)

T_1 = Temperatura do corpo 1 ($^\circ\text{C}$)

T_2 = Temperatura do corpo 2 ($^\circ\text{C}$)

Para este mecanismo, o coeficiente de transferência de calor radiativo depende das temperaturas de ambos os corpos envolvidos na transferência de calor, pelo que o fluxo de transferência de calor por radiação apresenta uma maior dependência da diferença de temperatura entre ambos os corpos, em comparação com os mecanismos descritos anteriormente.

2.1.2. Balanço Térmico

Tendo descrito anteriormente os diferentes mecanismos de transferência de calor existentes, é necessário saber qual a sua influência no balanço térmico de um compartimento ou edifício. Para o balanço térmico de um compartimento é preciso ter em conta diversos fatores, tais como os ganhos internos, os ganhos solares e os ganhos de ventilação. Adicionalmente, os ganhos ou perdas de climatização e as trocas de calor com a envolvente também apresentam um papel fundamental para o balanço térmico (Figura 2.2 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**).

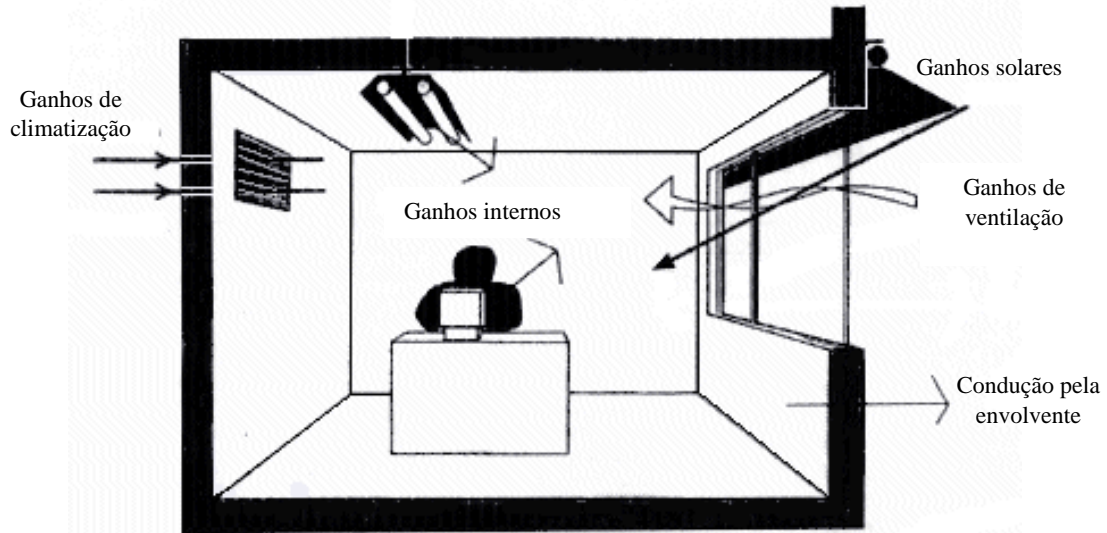


Figura 2.2 – Parâmetros que influenciam o balanço térmico de um edifício, adaptado de [6].

O balanço térmico de um edifício pode então ser descrito através da equação (2.4):

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho \cdot c_p \cdot V_s \cdot \frac{dT_i}{dt} + \sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n (T_i - T_{sn}) \quad (2.4)$$

Onde:

G_i = Ganhos internos (W)

G_s = Ganhos solares (W)

G_v = Ganhos de ventilação (W)

G_c = Ganhos de climatização (W)

ρ = densidade do fluido (kg/m³)

c_p = calor específico (J/kg.K)

V_s = Volume do compartimento (m³)

$\frac{dT_i}{dt}$ = Variação da temperatura interior ao longo do tempo (°C/s)

A_n = Área da superfície onde se dá a transferência de calor (m^2)

U_n = Coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

T_{sn} = Temperatura da superfície onde se dá a transferência de calor ($^\circ C$)

Os ganhos internos são os ganhos de calor devidos à ocupação dos espaços pelas pessoas, à utilização de equipamentos elétricos e à iluminação dos espaços.

Os ganhos solares são causados pela incidência de radiação solar nos vãos envidraçados do edifício, sendo dependentes do recurso solar a cada instante e das características dos materiais utilizados nos vãos. Os ganhos solares são traduzidos pela seguinte expressão:

$$G_s = A_v \cdot F_s (R_{direta} \cdot \cos(\text{alt}) \cdot \cos(\text{azi}) + F_{fJC} \cdot R_{difusa}) \quad (2.5)$$

Onde:

A_v = Área dos vãos envidraçados (m^2)

F_s = Fator solar do vidro

R_{direta} = Radiação direta (W/m^2)

alt = Altitude solar ($^\circ$)

azi = Azimute solar ($^\circ$)

F_{fJC} = Fator de forma entre a janela e o céu

R_{difusa} = Radiação difusa (W/m^2)

Os ganhos de ventilação dizem respeito às trocas de energia térmica através da ventilação do edifício com ar proveniente do exterior, dependendo assim do caudal volúmico de ventilação (\dot{v}) e da diferença de temperatura entre o ar exterior e interior. Os ganhos de ventilação podem então ser obtidos através da equação (2.6):

$$G_v = \rho \cdot c_p \cdot \dot{v} (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.6)$$

Analisando a equação (2.4) é possível verificar que existe um termo que depende da variação da temperatura ao longo do tempo, pelo que pode ser assumido que o edifício se encontra num estado estacionário, tornando este termo nulo, facilitando assim os cálculos do balanço térmico. No entanto, esta aproximação pode não ser a mais correta, uma vez que existem variações da temperatura interna dos edifícios ao longo do tempo, levando a que seja necessário um cálculo dinâmico para o balanço térmico do edifício. Devido à complexidade destes cálculos, este efeito transiente no balanço térmico apenas é considerado se for possível a utilização modelos numéricos computacionais. Estes modelos são

utilizados por ferramentas de simulação dinâmica que serão discutidas com pormenor na secção seguinte.

2.2. Simulação dinâmica computacional – *EnergyPlus*

Tal como foi referido anteriormente, devido à sua complexidade, a componente dinâmica da equação do balanço térmico nos edifícios leva a que seja necessário a utilização de ferramentas de simulação dinâmica para o cálculo deste balanço ao longo do tempo. Além disso, estas ferramentas de simulação desempenham um papel crucial na fase de projeto dos edifícios. Cada edifício tem as suas características e, portanto, são precisas ferramentas para a caracterização do comportamento térmico de cada um. Através desta caracterização e de uma análise do conforto dos ocupantes do edifício, é possível uma otimização dos seus sistemas energéticos, tornando-o o mais eficiente possível.

A ferramenta de simulação dinâmica utilizada neste trabalho foi o *EnergyPlus* versão 8.7.0 que é um programa *open source*, baseado em dois outros programas de simulação energética em edifícios: o *DOE-2* e o *Blast*, ambos desenvolvidos pelo governo dos Estados Unidos da América. Estes dois programas tinham como alguns dos principais objetivos o dimensionamento de equipamento de AVAC apropriado para o edifício e a otimização da performance energética do edifício. No entanto, estes apresentavam um código bastante complexo e a sua exatidão dependia do caso em que eram utilizados, sendo que para uns casos o *DOE-2* era a ferramenta mais indicada e para outros era o *Blast*. O *EnergyPlus* surge como uma junção destas duas ferramentas, tornando, assim, o seu código mais simples e fácil de entender e aproveitando as vantagens de cada um dos programas, tornando-o mais completo e exato [7], [8].

Para efetuar a simulação do edifício através do programa *EnergyPlus* é preciso fornecer ao programa um modelo geométrico do edifício, tendo sido desenvolvido com recurso ao *software Sketchup* para o presente trabalho. Além do modelo geométrico, é também necessário um ficheiro climático representativo do clima em que o edifício se encontra inserido, para que os cálculos de balanço térmico sejam efetuados tendo em conta o clima local. Após o desenvolvimento do modelo geométrico, é possível definir os diferentes parâmetros característicos do edifício que irão influenciar o balanço térmico deste. Estes parâmetros vão desde os seus sistemas energéticos, ao seu perfil de ocupação, às soluções construtivas utilizadas, taxas de infiltração e de ventilação do edifício (caso existam), entre outros.

Através dos diferentes *inputs* do modelo de simulação no *EnergyPlus*, o programa é capaz de calcular, para cada intervalo de tempo definido, os diferentes parâmetros que caracterizam o seu comportamento térmico. Entre outros *outputs*, é possível obter a temperatura média do ar das diferentes zonas térmicas do edifício, os ganhos de energia térmica definidos anteriormente na equação (2.4) e a carga de climatização das diferentes zonas [9].

Para além dos parâmetros que caracterizam o comportamento térmico do edifício, o *software EnergyPlus* permite obter informação sobre os sistemas energéticos do edifício. Para cada intervalo de tempo definido no programa é possível obter o valor do consumo dos sistemas de iluminação do edifício e dos equipamentos elétricos. Neste programa é também possível a definição de diferentes tecnologias de produção de energia renovável no modelo de simulação, obtendo os valores de produção horária para cada um destes geradores.

Na Figura 2.3 encontra-se representado um esquema da metodologia de simulação de um modelo em *EnergyPlus*:

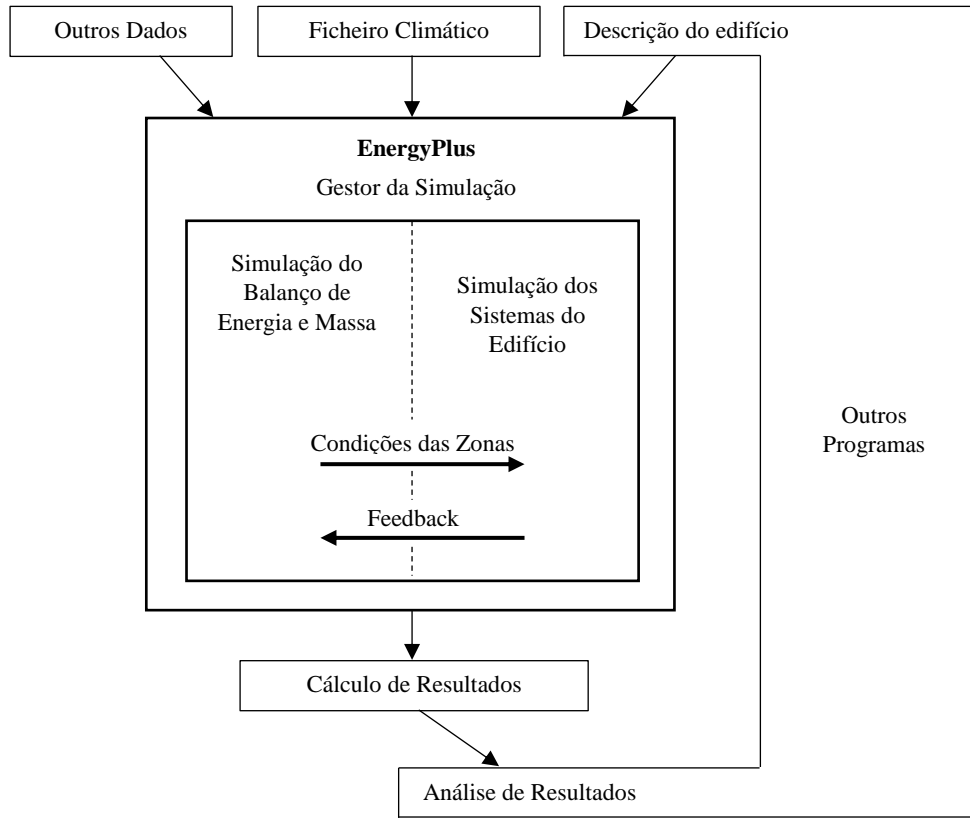


Figura 2.3 – Processo de simulação através do *software EnergyPlus*, adaptado de [7]

O balanço térmico do ar de uma determinada zona z efetuado pelo *software EnergyPlus* é traduzido através da equação (2.7) [10]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i \cdot A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} \cdot C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sis} \quad (2.7)$$

Onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ = Energia armazenada no ar

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ = Somatório dos ganhos internos convectivos

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i \cdot A_i (T_{si} - T_z)$ = Transferência convectiva de calor das superfícies

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_p (T_{zi} - T_z)$ = Transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas

$\dot{m}_{inf} \cdot C_p (T_{\infty} - T_z)$ = Transferência de calor devido à infiltração de ar exterior

\dot{Q}_{sis} = Carga térmica do sistema de climatização introduzida na zona

2.3. Sistemas energéticos *off-grid*

Os sistemas energéticos *off-grid*, tal como o nome indica, são sistemas energéticos que não se encontram ligados à rede elétrica nacional, sendo estes sistemas autossuficientes. Atendendo ao facto de que o transporte de energia pode ser efetuado em corrente contínua ou em corrente alternada, estes sistemas podem apresentar configurações distintas. As três configurações de sistemas energéticos *off-grid* existentes são: a configuração DC, a configuração AC e a configuração híbrida [11].

Devido ao variado leque de geradores existentes, os sistemas energéticos podem também ser diferenciados através dos seus componentes, apresentando assim constituições distintas. Os geradores utilizados nos sistemas energéticos *off-grid* vão desde os geradores convencionais até aos geradores renováveis mais recentes, tais como as turbinas eólicas e os painéis solares fotovoltaicos [12], [13], [14], [15].

Assim sendo, a constituição de um sistema energético *off-grid* depende não só da sua configuração, mas também da disponibilidade de recursos no local, o que leva a que estes possuam componentes distintos.

2.3.1. Configurações dos sistemas energéticos

Configuração DC:

Neste tipo de configuração, a alimentação da carga é sempre efetuada através de corrente contínua. Os recursos renováveis de geração de corrente contínua encontram-se diretamente ligados à alimentação DC, ou através de um conversor DC/DC. Os recursos renováveis de geração de corrente alternada encontram-se ligados à alimentação DC através de um conversor AC/DC. Como os sistemas de armazenamento funcionam com corrente contínua, pode haver uma ligação direta dos recursos renováveis de geração de corrente contínua aos sistemas de armazenamento. No caso de cargas de corrente alternada, é ainda necessário um inversor DC/AC para que estas possam ser alimentadas por estes sistemas energéticos.

A grande vantagem deste tipo de configuração é o facto de poder haver uma ligação direta entre a produção renovável de corrente contínua e os sistemas de armazenamento. Tal vantagem deve-se ao facto de este tipo de produção ser não despachável e não controlável. Em alturas de excesso de produção, este excesso pode ser armazenado nos sistemas de armazenamento sem que sejam necessários inversores, diminuindo assim as perdas energéticas ao longo do processo. No entanto, se a maior parte das cargas for alimentada por corrente alternada, este sistema deixa de ser mais vantajoso, isto porque o aumento do número de inversores utilizados para alimentar a carga irá aumentar as perdas energéticas do sistema.

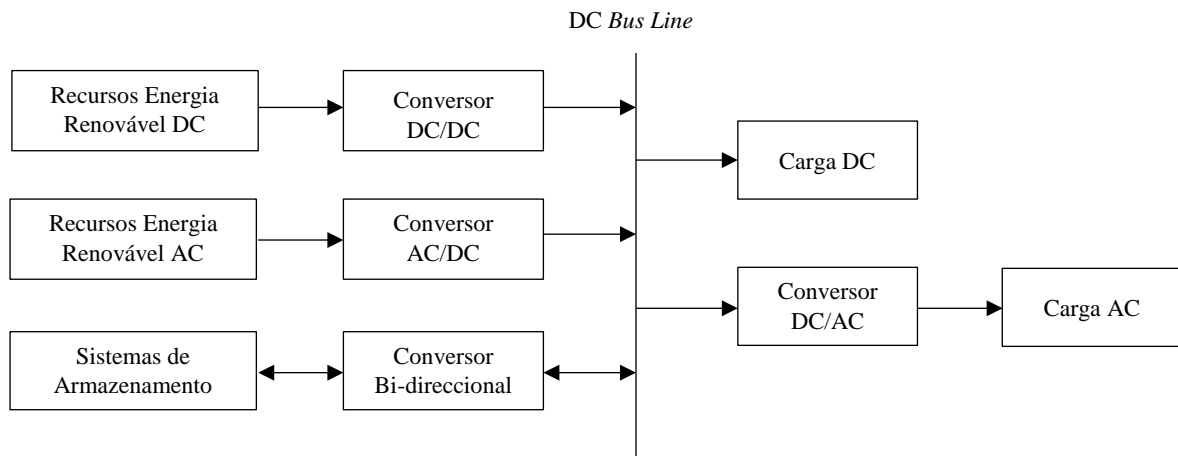


Figura 2.4 – Esquema da configuração DC de um sistema energético *off-grid*, adaptado de [11].

Configuração AC:

Neste tipo de configuração, a alimentação da carga é sempre efetuada através de corrente alternada. Os recursos renováveis de geração de corrente contínua encontram-se ligados à alimentação AC através de um conversor DC/AC. Por outro lado, os recursos renováveis de geração de corrente alternada podem estar diretamente ligados à alimentação AC ou através de um conversor AC/AC. Neste caso já é necessário a utilização de um conversor AC/DC para os sistemas de armazenamento, visto que estes são de corrente contínua e o transporte de energia é feito através de corrente alternada. Para sistemas com esta configuração, as cargas de corrente alternada podem-se encontrar diretamente ligadas à alimentação AC, enquanto as cargas de corrente contínua necessitam ainda de um conversor AC/DC para que possam ser alimentadas pelo sistema.

Esta configuração pode ser entendida como o inverso da configuração DC, sendo a sua maior vantagem o facto de não necessitar de conversores para alimentar a maior parte da carga. A sua maior desvantagem é a necessidade de conversores AC/DC ligados aos sistemas de armazenamento.

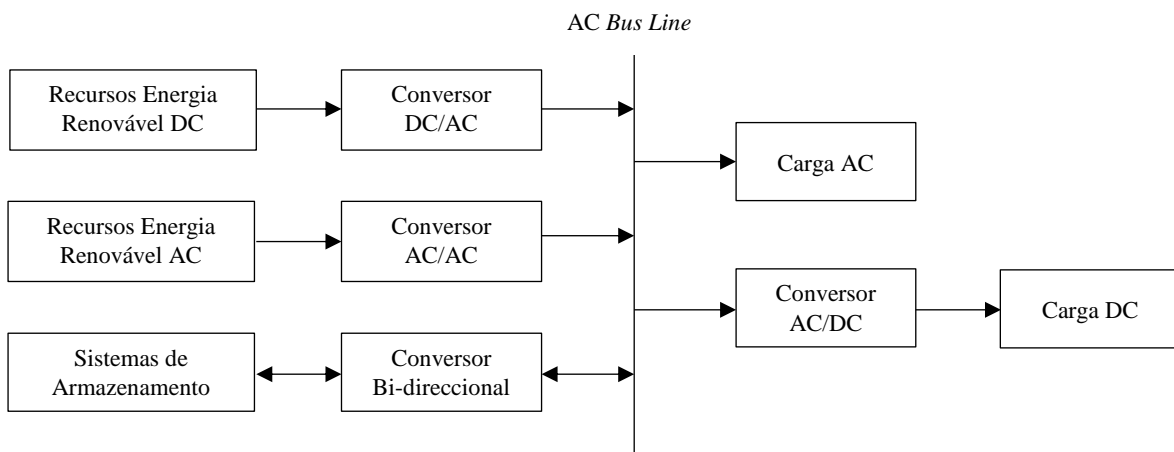


Figura 2.5 – Esquema da configuração AC de um sistema energético *off-grid*, adaptado de [11].

Configuração Híbrida:

A configuração híbrida é uma mistura entre as duas configurações apresentadas anteriormente, podendo o transporte de energia ser efetuado, tanto em corrente contínua, como em corrente alternada. Os recursos renováveis de geração de corrente contínua encontram-se ligados diretamente à alimentação DC, ou através de um conversor DC/DC. Os sistemas de armazenamento também se encontram ligados diretamente à alimentação DC. Os recursos renováveis de geração de corrente alternada encontram-se ligados diretamente à alimentação AC, ou através de um conversor AC/AC. No que toca aos diferentes tipos de carga do sistema (carga de corrente contínua e carga de corrente alternada) cada uma encontra-se ligada diretamente à alimentação respetiva.

Esta configuração é a mais vantajosa de todas, pois permite que o transporte de energia seja efetuado, tanto em corrente contínua, como em corrente alternada. Como existem os dois tipos de alimentação, o número de conversores utilizados será muito mais reduzido, permitindo assim uma redução das perdas de conversão. No entanto, esta configuração gera uma maior complexidade em termos do controlo e da gestão energética, pelo que é necessária uma monitorização constante deste tipo de sistemas.

Acoplado a este tipo de sistemas energéticos renováveis *off-grid*, pode existir também um sistema de gerador a *diesel*. Nesta configuração, o gerador a *diesel* é um gerador de reserva que é utilizado sempre que a produção do sistema renovável não é suficiente para suprir o consumo total do sistema. Este gerador de reserva aumenta a fiabilidade do sistema visto que a maior parte das tecnologias de produção de energia renovável destes sistemas energéticos não apresenta uma garantia de produção, estando esta dependente da variabilidade de recursos. Este aumento de fiabilidade é mais uma vantagem desta configuração, uma vez que este tipo de sistemas não se encontra ligado à rede elétrica nacional.

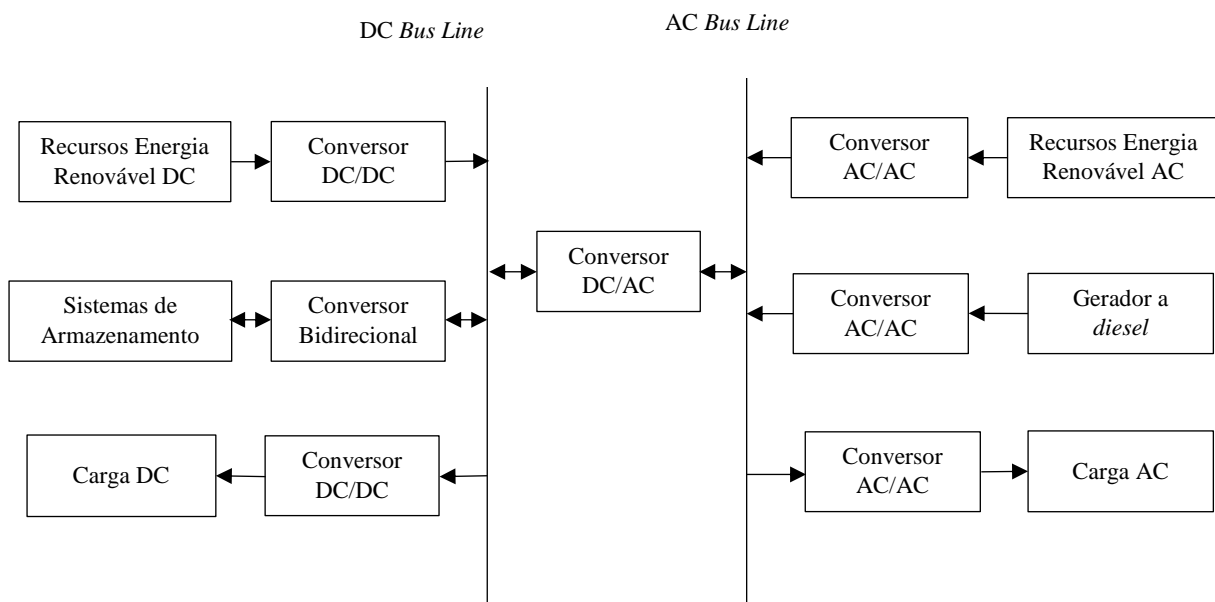


Figura 2.6 – Esquema da configuração híbrida de um sistema energético *off-grid*, adaptado de [11]

2.3.2. Estudos de sistemas energéticos *off-grid* existentes

Em diversos locais remotos do mundo, onde não existe nenhuma ligação a uma rede elétrica, os sistemas energéticos *off-grid* apresentam-se como uma solução viável para suprir os consumos de energia elétrica das populações desses locais. No entanto, é necessário um estudo pormenorizado antes da implementação de um sistema deste tipo, de modo a obter um sistema corretamente dimensionado e o mais eficiente possível. Estes estudos permitem também analisar qual a melhor solução para as diferentes localidades, quer em termos económicos, quer em termos ambientais.

Num estudo realizado por Chmiel et al. (2015) foi feita uma análise do impacto da utilização de diferentes constrangimentos no dimensionamento do sistema energético ótimo [12]. Neste estudo pode-se verificar que com a introdução de diferentes constrangimentos no *software HomerPro* existe uma diferença no sistema energético obtido. Para além dos constrangimentos introduzidos, a avaliação do potencial renovável do local também desempenha um papel importante no dimensionamento do sistema, pois permite averiguar quais são as tecnologias mais vantajosas para cada localização.

Ali et al. (2017) publicaram um estudo onde foi feita uma análise da viabilidade da instalação de um sistema híbrido *off-grid* numa cidade remota na região Ocidental da Austrália, sendo o sistema energético atual desta cidade composto apenas por geradores a *diesel* [13]. Esta foi a localidade escolhida para este estudo, pois o seu potencial renovável pode fazer face aos principais problemas enfrentados pela companhia que gere a produção de eletricidade nesta cidade: o custo do combustível e o seu transporte. Para este estudo foram analisados diferentes sistemas energéticos híbridos, compostos por diferentes combinações de geradores a *diesel*, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento (baterias). Através dos resultados obtidos pode-se verificar que o sistema energético que leva a um maior custo energético é composto por painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e baterias. Tal resultado deve-se ao facto de estas tecnologias terem um custo inicial mais elevado, para além de que esta combinação necessita de um banco de baterias com uma capacidade bastante elevada, o que leva também a um aumento significativo dos custos totais do sistema. Por outro lado, o sistema energético que leva a um menor custo energético apresenta uma composição igual à anterior com a adição de geradores a *diesel*. O custo de eletricidade deste sistema é o mais reduzido, pois este já não necessita de um banco de baterias com uma capacidade tão elevada, visto também possuir geradores a *diesel* que funcionam como auxílio aos geradores renováveis.

Noutro estudo realizado por Dalton et al. (2007), foi feito o dimensionamento de um sistema energético *off-grid* para um hotel de grandes dimensões localizado no estado de Queensland, na Austrália [14]. À semelhança do estudo anterior foram estudados sistemas com diferentes combinações de geradores a *diesel*, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e baterias. Através dos resultados obtidos foi também possível verificar que com a utilização dos geradores a *diesel* é possível obter um sistema energético com um custo total mais reduzido. Para além destes resultados foi também possível verificar que o *software HomerPro* permite que a carga do sistema seja modelada através de duas estratégias distintas: *Load Following* e *Cycle Charging*. Segundo a estratégia de *Load Following*, as baterias são carregadas pelos geradores renováveis de produção variável no tempo, enquanto os geradores convencionais apenas produzem o suficiente para suprir a carga. A estratégia de *Cycle Charging* é o contrário da descrita anteriormente, pelo que o carregamento das baterias é efetuado pelos geradores convencionais, produzindo estes mais energia do que a necessária. Neste estudo é mencionado que a estratégia de *Cycle Charging* é mais vantajosa para sistemas de maior dimensão devido ao facto de reduzirem o risco de sobre descarga e permitirem uma menor frequência de paragem e arranque. Através destas

possibilidades garantidas pela estratégia de *Cycle Charging* é possível garantir uma maior longevidade das baterias e dos geradores a *diesel*, reduzindo assim os seus custos de substituição, conduzindo a um custo total do sistema mais reduzido.

Num estudo publicado por Silva et al. (2015) é também realizado o dimensionamento de um sistema energético para uma casa unifamiliar em Catuçaba, uma pequena aldeia que fica a 150 km de São Paulo, Brasil [15]. Neste estudo, para além da utilização do *HomerPro* para o dimensionamento do sistema energético do edifício, são também realizadas simulações em *EnergyPlus* com o intuito de avaliar o comportamento térmico do edifício e obter o seu consumo anual de energia elétrica. Através destas simulações é feita uma otimização da arquitetura do edifício, conduzindo assim a um menor valor do seu consumo anual de energia elétrica. Com os valores de consumo obtidos, foi feito o dimensionamento do sistema energético do edifício com recurso ao *software HomerPro*. O cenário favorável ao edifício é composto por painéis solares fotovoltaicos (2 kW), uma turbina eólica (1 kW), um banco de baterias (600 Ah) e inversores (3.2 kW).

Todos estes estudos foram analisados devido à sua semelhança com o presente estudo realizado para o dimensionamento do sistema energético *off-grid* da adega da Ilha do Pico. Estes estudos foram realizados com recurso ao *software HomerPro* e a configuração dos sistemas estudados é semelhante à possível configuração do sistema energético da adega.

As conclusões retiradas e as análises realizadas nestes quatro estudos revelam-se de grande importância para o presente estudo. Após a revisão do primeiro estudo, é possível concluir que é necessária uma avaliação detalhada dos recursos renováveis do local e dos constrangimentos do sistema para que este seja corretamente dimensionado e o mais eficiente possível. Com o segundo e terceiro estudos, como auxílio aos geradores renováveis, verificou-se que a utilização de geradores a *diesel* permite uma redução da capacidade dos sistemas de armazenamento, conduzindo a um custo total do sistema mais reduzido. Para além disso, através do terceiro estudo, é possível verificar que existem diferentes estratégias de modelação da carga no *software HomerPro*, sendo que a estratégia vantajosa depende da dimensão do sistema em análise. O último estudo apresentado possui a particularidade de utilizar uma metodologia semelhante à que será implementada no presente estudo, servindo, assim, como auxílio à sua elaboração.

2.4. Modelação do sistema energético – *HomerPro*

Através dos valores de consumo de energia elétrica do edifício é necessário obter uma solução para que mesmo que o edifício não se encontre conectado à rede elétrica nacional, todos os seus consumos de energia elétrica possam ser supridos.

Neste trabalho, a ferramenta utilizada com o objetivo de analisar as diferentes soluções possíveis para suprir os consumos energéticos do edifício foi o programa *HomerPro*. Este foi o programa escolhido devido ao facto dos seus algoritmos de otimização e de análise de sensibilidade facilitarem a avaliação das diferentes configurações possíveis do sistema energético.

O *HomerPro* é uma ferramenta analítica utilizada no dimensionamento de sistemas energéticos criada pela NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) nos Estados Unidos da América. Esta ferramenta permite a modelação dos vários tipos de geradores que existem e também a modelação da carga elétrica em corrente contínua ou em corrente alternada.

Para o dimensionamento do sistema energético é preciso fornecer ao programa o diagrama de carga que tem de ser suprido com o sistema e a disponibilidade dos recursos no local. Através da base de dados do programa é possível escolher quais os geradores que podem ser instalados no local, fornecendo ainda informações acerca das suas características principais, tal como o seu tempo de vida útil e os seus custos. Através destes *inputs*, o *HomerPro* simula diferentes configurações do sistema, apresentando como resultados os sistemas energéticos possíveis para o diagrama de carga fornecido. Os resultados permitem avaliar quais os diferentes custos dos componentes do sistema e ainda fazer uma análise da produção elétrica de cada um dos geradores [16].

Além da seleção dos componentes do sistema, é também preciso selecionar a forma como o *HomerPro* modela a carga do sistema. Tal como referido no capítulo anterior, a carga pode ser modelada através de duas estratégias: *Load Following* ou *Cycle Charging*. Segundo a estratégia de *Load Following*, as baterias são carregadas pelos geradores renováveis de produção variável no tempo, enquanto os geradores convencionais apenas produzem o suficiente para suprir a carga. Para a estratégia de *Cycle Charging* as baterias são carregadas através dos geradores convencionais, produzindo estes mais energia do que a necessária [14].

3. Caso de estudo

Tendo como objetivo o estudo de um sistema energético para uma adega autossuficiente, primeiramente é necessário avaliar o clima em que esta se encontra inserida, sendo que o clima influencia os níveis de consumo de energia elétrica do edifício. Para além desta análise, é também preciso definir quais as soluções construtivas do edifício, possibilitando o desenvolvimento de um modelo de simulação que consiga representar o edifício em estudo de uma forma fidedigna.

Neste capítulo realizar-se-á uma identificação da localização do edifício em estudo, bem como uma análise do clima local, de modo a obter uma informação pormenorizada acerca do clima onde o edifício em estudo se encontra inserido. Aliada a esta análise, será também feita uma descrição do edifício em estudo e das suas soluções construtivas.

3.1. Localização

O edifício em estudo localiza-se na vila Madalena na Ilha do Pico, Açores (Figura 3.1). O edifício destina-se não só à produção e armazenamento de vinhos, mas também possui apartamentos destinados ao turismo rural e um restaurante com o intuito de servir como espaço para eventos relacionados com as atividades do edifício.



Figura 3.1 – Localização do edifício em estudo, adaptado de *Google Earth*.

O ficheiro climático do local de estudo foi obtido com recurso ao *software* do LNEG. Neste ficheiro é possível encontrar dados acerca das diferentes variáveis climáticas: temperatura de bolbo seco, radiação solar direta e difusa horizontal, velocidade e direção do vento, entre outros; para um ano meteorológico de referência. Este *software* foi desenvolvido de forma a fornecer os dados climáticos para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios – SCE. Para a obtenção dos dados climáticos basta selecionar o

município em estudo e a sua altitude e o *software* providencia o ano meteorológico de referência do local [17].

Através do ficheiro climático da vila Madalena, procedeu-se à análise do clima local. Esta análise foi realizada não só com o intuito de avaliar os níveis de temperatura exterior ao longo do ano, mas também de avaliar o potencial renovável do local onde será construído o edifício (Figuras 3.2 e 3.3). Na Figura 3.2 encontram-se representadas a temperatura média, mínima e máxima mensal ao longo do ano e o respetivo intervalo de conforto térmico, estando este compreendido entre os 20°C e os 25°C. Na Figura 3.3 encontra-se representada a média mensal das duas componentes da radiação solar.

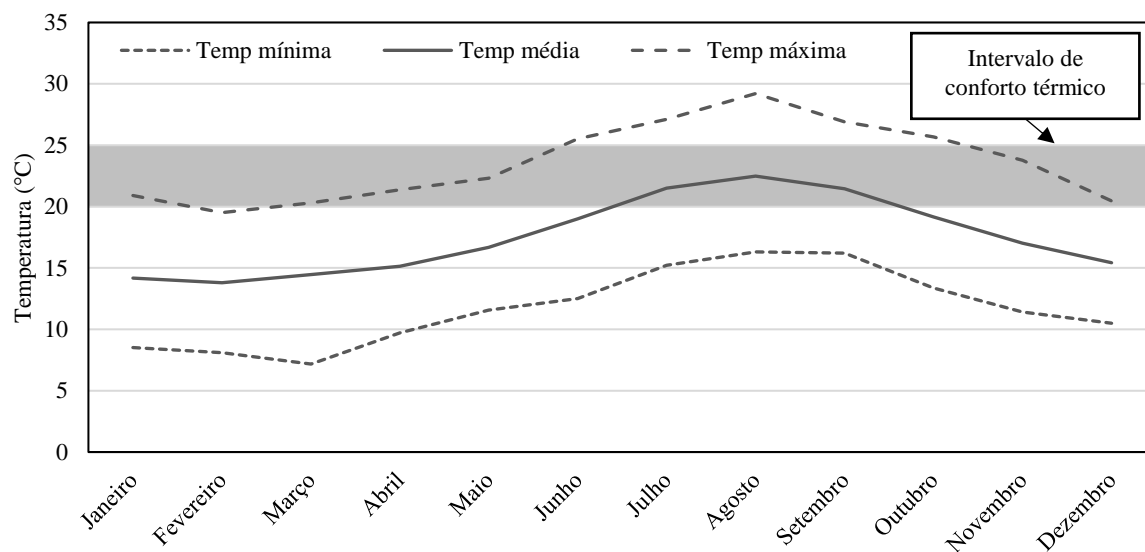


Figura 3.2 – Temperatura média, mínima e máxima mensal do clima da vila Madalena na Ilha do Pico, Açores.

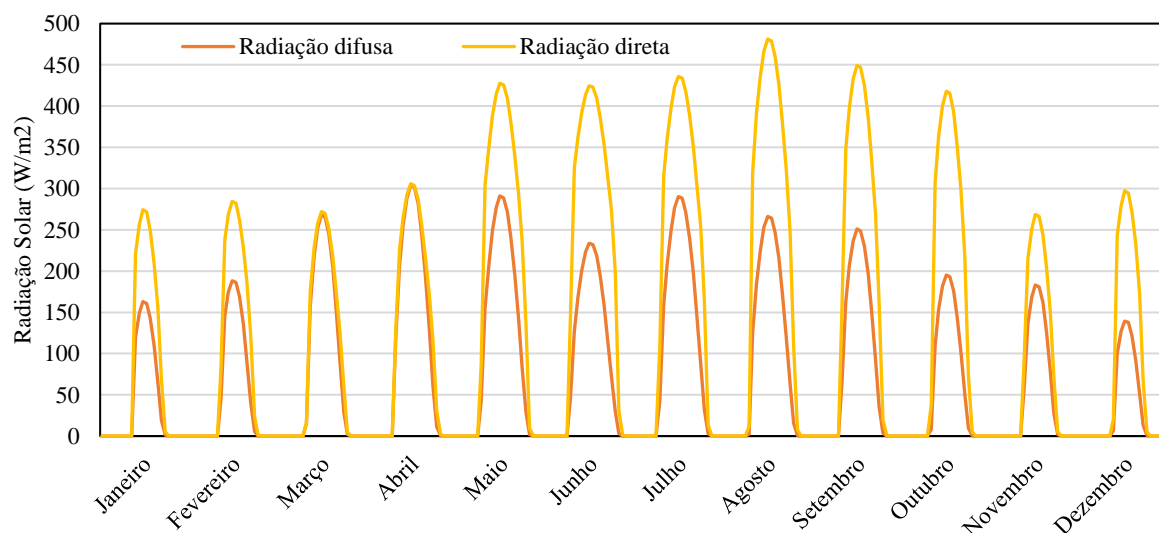


Figura 3.3 – Radiação difusa e direta média mensal da vila Madalena na Ilha do Pico, Açores.

Em termos de temperatura exterior, este clima apresenta uma temperatura média anual de aproximadamente 17.5°C. Através desta análise foi possível constatar que a temperatura exterior está dentro dos parâmetros de conforto durante 2057 horas por ano, o que equivale a 23.5% das horas anuais. No entanto, durante 73% do ano, a temperatura exterior está abaixo dos 20°C, tal como é possível observar na Figura 3.2, onde a temperatura média mensal se encontra praticamente sempre abaixo do intervalo de conforto. Com esta análise é possível verificar que o clima da vila Madalena é vantajoso para a ventilação natural do edifício visto possuir uma temperatura média de 17.5°C e apresentar uma temperatura inferior a 20°C durante praticamente três quartos do ano.

Analisando a Figura 3.3, pode-se verificar que a vila Madalena apresenta um potencial solar razoável. Para os meses com maiores níveis de radiação média mensal, desde maio até outubro, ao meio dia solar, que é quando se regista o pico de radiação, os valores médios de radiação direta não chegam a 500 W/m². Também é possível observar que os valores de radiação difusa média mensal são elevados, sendo que nos meses de março e abril os valores de radiação difusa e direta são praticamente os mesmos. Tais resultados podem dever-se ao facto de o clima dos Açores ser caracterizado pela ocorrência de nuvens ao longo de todo o ano, aumentando assim a difusão dos raios solares na atmosfera e reduzindo a radiação solar direta incidente na superfície terrestre.

3.2. Descrição do edifício

Com o objetivo de possibilitar uma análise visual da arquitetura do edifício em estudo, foi efetuado um modelo 3D do mesmo, estando este representado na Figura 3.4 e na Figura 3.5. Este modelo foi desenvolvido com recurso ao *software SketchUp*, versão de 2017, e baseado nas plantas e alçados do edifício fornecidos pelo cliente, estando estes últimos presentes no Anexo I. Na Figura 3.6 é possível observar a planta da adega da Ilha do Pico, onde se encontram identificadas as principais zonas do edifício.

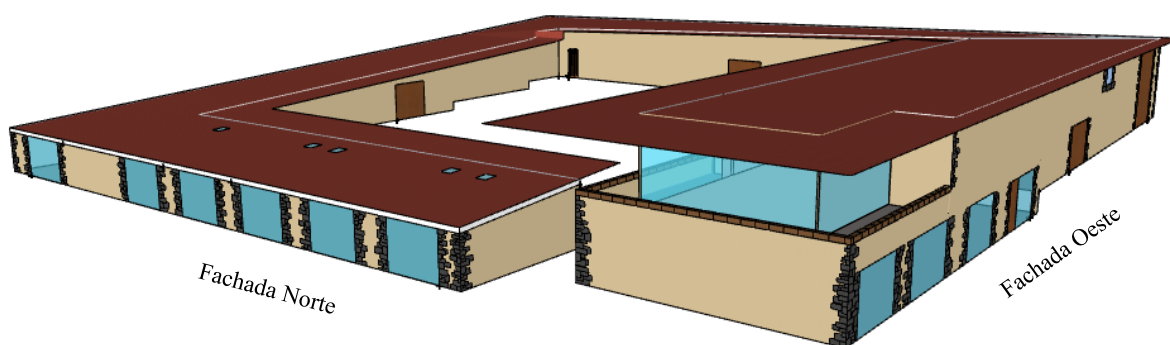


Figura 3.4 – Modelo 3D do edifício em estudo.

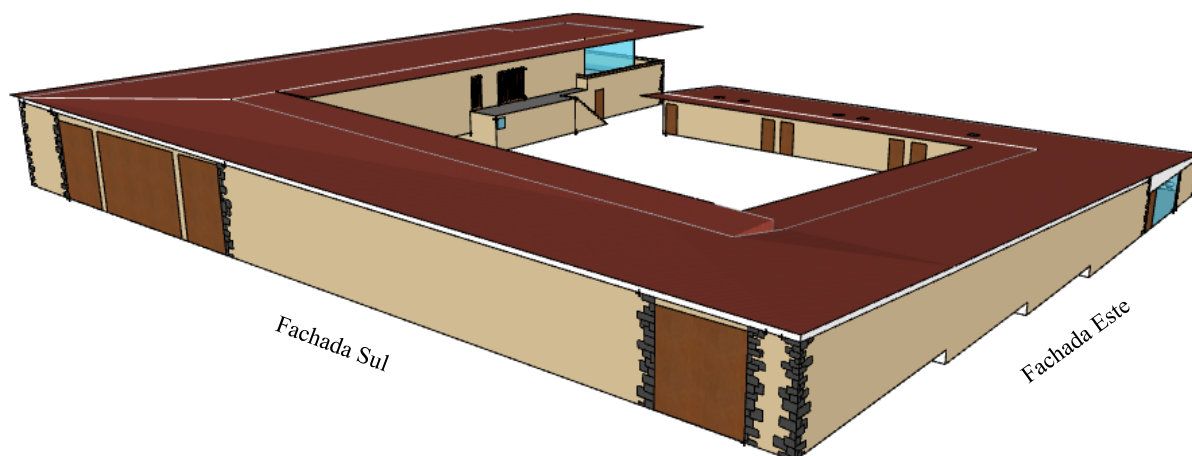


Figura 3.5 – Modelo 3D do edifício em estudo.

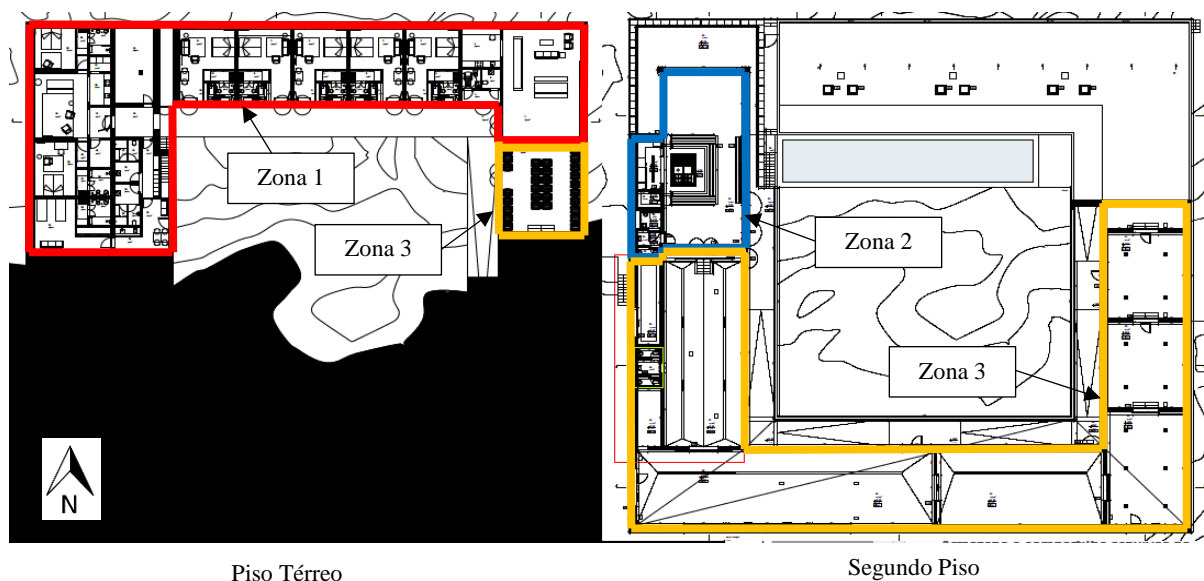


Figura 3.6 – Divisão da planta do edifício em estudo nas suas três zonas principais.

Tal como foi referido anteriormente, além das divisões reservadas à produção e armazenamento dos vinhos, o edifício possui também outras divisões, no piso térreo, destinadas ao turismo rural. A área destinada ao turismo rural é constituída pela receção e por mais 5 quartos com *kitchenette*, que se encontram na fachada Norte. Para além disso existe ainda a casa dos proprietários e do *staff*, que diz respeito ao bloco de divisões que se encontram na fachada Oeste do piso térreo. A casa dos proprietários e do *staff* é composta por três quartos, duas salas de estar, balneários e outras divisões que servem como arrumos ou adegas privadas. Na Figura 3.6 todas as divisões que dizem respeito à casa dos proprietários, à receção e aos quartos destinados ao turismo rural encontram-se identificadas pela Zona 1. No piso superior existe também um restaurante, que se encontra acima da casa dos proprietários, estando este

identificado como Zona 2 (Figura 3.6). Todas as outras zonas do piso superior são destinadas à produção e armazenamento dos vinhos e encontram-se identificadas como Zona 3 (Figura 3.6).

Analisando as soluções construtivas do edifício, é possível verificar que este é caracterizado por um tipo de construção pesada. A utilização de betão na construção do edifício torna-o mais pesado, o que, consequentemente, leva a um aumento da sua inércia térmica.

A utilização de betão na construção do edifício da adega do Pico pode ter como motivo alguns aspetos estruturais do mesmo. Tendo em conta a geomorfologia do terreno onde será construído o edifício, este necessita de uma quantidade considerável de betão, sendo este utilizado não só no pavimento mas também nas paredes interiores e exteriores para que o edifício seja estável e não colapse ao longo do seu tempo de vida útil.

Em praticamente todas as soluções construtivas do edifício também é utilizado isolamento térmico, exceto nas paredes entre os quartos e as casas de banho e nas paredes exteriores viradas para o pátio interior do edifício (paredes exteriores simples). O isolamento térmico permite manter a inércia térmica do edifício auxiliando, assim, na diminuição da carga de climatização das suas diferentes divisões. Nas paredes, o isolamento térmico utilizado é o poliestireno extrudido (XPS), enquanto no caso do teto é também utilizada a lã mineral que, para além das suas propriedades térmicas, permite também um isolamento acústico das divisões.

Na Tabela 3.1 encontram-se as soluções construtivas utilizadas na adega da Ilha do Pico.

Tabela 3.1 – Características dos materiais utilizados nas soluções construtivas do edifício em estudo, apresentadas do interior para o exterior.

Material	Espessura (m)	Condutibilidade térmica (W/(m.K))	Massa volúmica (kg/m³)	Calor específico (J/(kg.K))
Pavimento				
Betonilha	0.07	1.35	1800	1000
XPS	0.03	0.04	32.5	1210
Massame armado	0.15	2	2100	880
Betonilha	0.25	1.35	1800	1000
Parede exterior				
Reboco	0.02	0.8	1600	800
Betão	0.25	1.4	2300	880
XPS	0.05	0.04	32.5	1210
Placa de gesso cartonado	0.03	0.25	875	1085
Alvenaria de pedra (basalto)	0.25	1.1	2850	840
Parede exterior simples				
Reboco	0.02	0.8	1600	800
Betão	0.25	1.4	2300	880
Reboco	0.05	0.8	1600	800
Parede interior				
Reboco	0.02	0.8	1600	800
Betão	0.1	1.4	2300	880
XPS	0.05	0.04	32.5	1210
Betão	0.15	1.4	2300	880
Reboco	0.02	0.8	1600	800
Parede entre os quartos e casa de banho				
Reboco	0.02	0.8	1600	800
Betão	0.15	1.4	2300	880
Reboco	0.02	0.8	1600	800
Teto do piso térreo / Pavimento do segundo piso (baixo para cima)				
Gesso Cartonado	0.01	0.25	875	1085
Lã Mineral	0.05	0.04	50	735
Laje de betão armado	0.26	2	2350	940
XPS	0.12	0.04	32.5	1210
Betonilha	0.05	1.35	1800	1000
Cobertura				
Laje de betão armado	0.26	2	2350	940
XPS	0.12	0.04	32.5	1210
Bagacina preta	0.15	1.35	1800	1000

4. Previsão do consumo energético do edifício

A previsão dos consumos de energia elétrica do edifício foi realizada com recurso ao *software EnergyPlus*, versão 8.7.0. Para que seja possível a obtenção dos consumos energéticos é então necessário desenvolver um modelo de simulação do edifício. Para o desenvolvimento do modelo de simulação foram inseridos todos os parâmetros do edifício que influenciam o seu consumo energético e os níveis de conforto interiores. Os parâmetros utilizados no modelo de simulação encontram-se descritos pormenorizadamente na secção seguinte.

4.1. Parâmetros de simulação

O primeiro parâmetro de simulação a ter em conta foi a definição das zonas térmicas do edifício, sendo estas as zonas utilizadas no desenvolvimento do modelo geométrico. Para esta definição foi feita uma divisão do edifício pelas suas zonas principais, tal como se pode verificar através da Figura 4.1

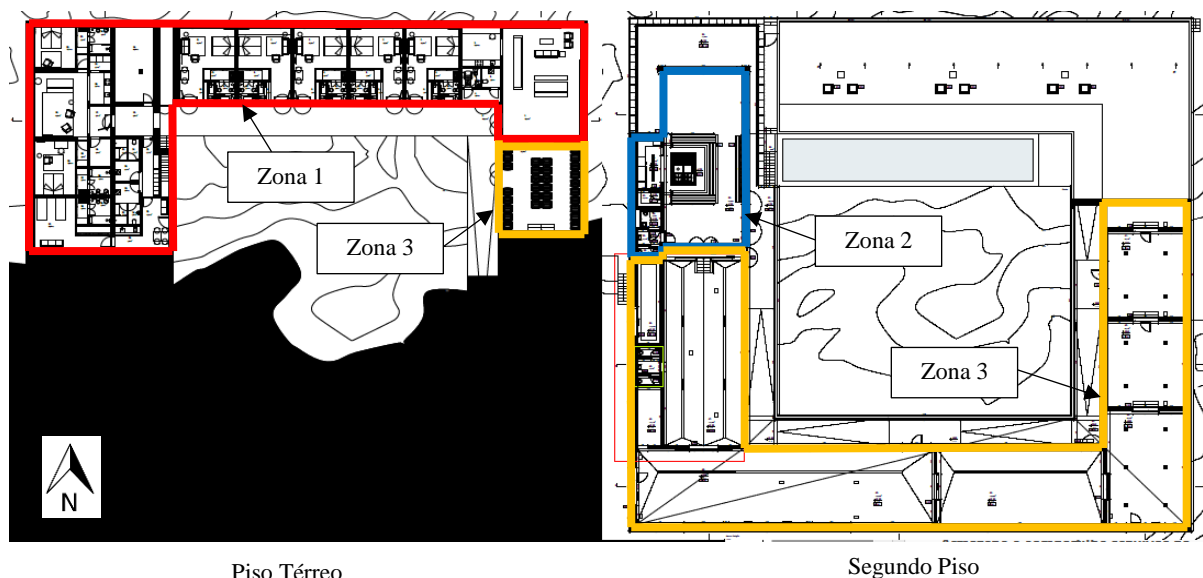


Figura 4.1 – Divisão da planta do edifício em estudo nas suas três zonas principais.

A zona 1 é composta pela casa dos proprietários e do *staff*, pelos quartos destinados ao turismo rural e pela receção. Neste bloco, para todas as divisões destinadas a arrumos e espaços de circulação que se encontrassem ligados a estas divisões, foi apenas utilizada uma zona térmica. Nos quartos, foi feita uma distinção entre o quarto e a casa de banho, sendo utilizada uma zona térmica para cada. Todas as outras divisões deste bloco foram consideradas como uma zona térmica.

A zona 2 é composta pelo restaurante, tendo sido definidas duas zonas térmicas para esta zona, uma para a cozinha e o restaurante, e outra para as casas de banho do restaurante. Foi utilizada apenas uma zona térmica para a cozinha e o restaurante devido ao facto de não haver qualquer divisão física entre ambos.

A zona 3 é composta pelas divisões do edifício reservadas para a adega. Para esta zona foi feita uma distinção entre as divisões destinadas para a produção e para o armazenamento do vinho, tendo sido

utilizada uma zona térmica para cada conjunto de divisões. Além disso, a adega possui ainda mais quatro divisões: duas divisões de arrumos, um laboratório e uma casa de banho; cada uma destas divisões foi definida como uma zona térmica.

Após a definição das zonas térmicas do edifício e do desenvolvimento do seu modelo geométrico, procedeu-se à definição do modelo de simulação do mesmo.

Primeiramente, definiram-se as soluções construtivas do edifício, tal como estão apresentadas na Tabela 3.1. Os vidros utilizados no modelo de simulação foram definidos como vidros duplos de baixa emissividade. Para as soluções construtivas que se encontram em contacto com o chão foi ainda adicionada uma camada de solo com uma espessura de 1.5 m, de modo a que estas atingissem uma profundidade de 2 m. Posteriormente, foram utilizados os valores de temperatura do solo a uma profundidade de 2 m no objeto *Site:GroundTemperatureBuildingSurface* de modo a modelar a transferência de calor entre o interior do edifício e o chão. Utilizou-se este método uma vez que o mesmo se encontra validado e não requer a utilização de outros subprogramas do *EnergyPlus* [18].

Seguidamente, procedeu-se à definição dos perfis de ocupação do edifício em estudo. Os perfis de ocupação foram efetuados com base em dados fornecidos pelo cliente, tendo sido definido um perfil médio para cada uma das divisões com base nas informações fornecidas. Para este modelo ficou definida uma ocupação de duas pessoas por quarto. Considerando que o bloco de divisões presentes na fachada Oeste do piso térreo diz respeito à casa dos proprietários e do *staff* da adega, estas encontram-se ocupadas durante todo o ano. Como nestas divisões existem quartos e salas de estar, os perfis de ocupação foram divididos por estas divisões consoante as horas do dia. De manhã e ao final da noite os quartos encontravam-se ocupados, enquanto durante o resto do dia eram as salas de estar que estavam ocupadas.

Para os quartos destinados ao turismo rural definiu-se que estes estariam ocupados todos os fins-de-semana, feriados e entre os meses de junho a setembro, inclusive. O restaurante apenas se encontraria ocupado na mesma altura em que haviam pessoas nos quartos destinados ao turismo rural, tendo este uma ocupação máxima de 25 pessoas. Para a receção definiu-se que esta se encontraria ocupada por uma pessoa entre as 8:00 e as 20:00 horas, ao longo do ano inteiro (Tabela 4.1).

Além dos perfis de ocupação, foi também necessário definir quais os ganhos de calor por pessoa, tendo estes influência no balanço térmico do edifício. Para as horas em que as pessoas se encontram acordadas, entre as 8:00 e as 00:00 horas, ficou definido um valor de 120 W por pessoa, enquanto para as horas em que as pessoas estão a dormir, ficou definido um valor de 80 W por pessoa. Foi feita uma distinção entre estes dois horários visto que quando as pessoas estão a dormir a sua atividade metabólica é mais reduzida, apresentando um menor valor de ganhos de calor.

Tabela 4.1 – Período de ocupação e número de ocupantes das diferentes divisões do edifício em estudo.

Divisões	Número de ocupantes	Período de ocupação
Casa dos proprietários e <i>staff</i>	6 pessoas (2 por quarto)	365 dias
Quartos para turismo rural	10 pessoas (2 por quarto)	Fins-de-semana, feriados e meses de verão (junho a setembro)
Restaurante	25 pessoas	Fins-de-semana, feriados e meses de verão (junho a setembro)
Receção	1 pessoa	365 dias (entre as 8h e as 20h)

Os perfis diários de ocupação das diferentes divisões encontram-se representados na Figura 4.2 – Perfis de ocupação das diferentes divisões do edifício em estudo., estando estes perfis em percentagens do valor absoluto presente na Tabela 4.1.

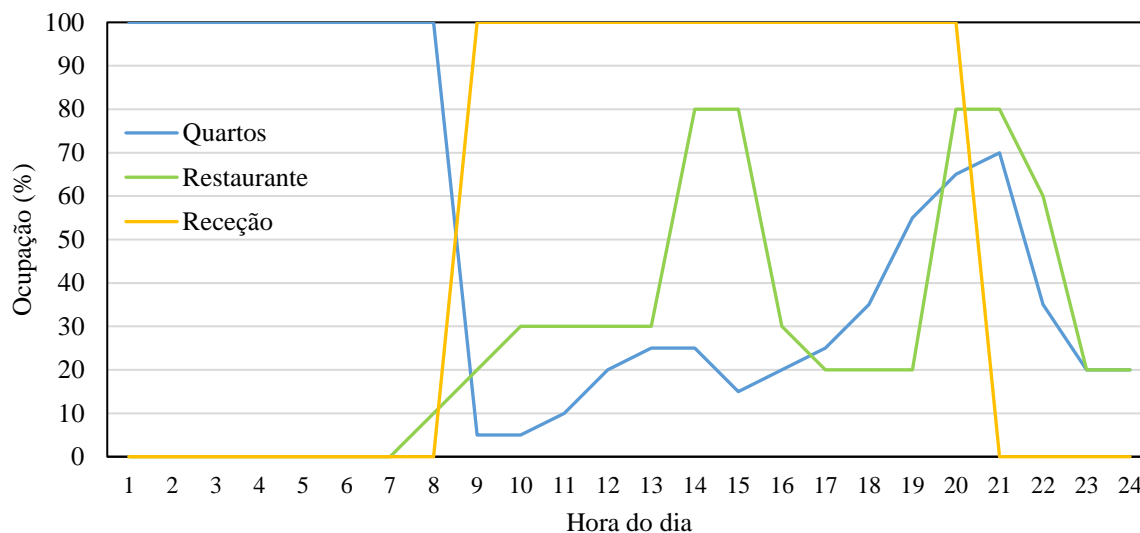


Figura 4.2 – Perfis de ocupação das diferentes divisões do edifício em estudo.

Para este modelo foi utilizado um valor de iluminação de 10 W/m^2 em praticamente todas as zonas, sendo que as divisões onde este valor não foi inserido dizem respeito a espaços de arrumação, onde a iluminação quase nunca é utilizada. O perfil de utilização dos sistemas de iluminação foi definido consoante os perfis de ocupação dos espaços (Figura 4.2 – Perfis de ocupação das diferentes divisões do edifício em estudo.), apenas utilizando estes sistemas quando as divisões estavam ocupadas. De modo a tornar os sistemas de iluminação mais eficientes, estes eram desligados sempre que era possível garantir um valor de iluminância de 300 lux nas divisões através de iluminação natural. No caso da sala onde eram armazenados os vinhos, o valor de iluminação utilizado é mais reduzido, 2.5 W/m^2 . Este foi o valor utilizado devido ao facto de os vinhos necessitarem de um armazenamento em zonas com pouca luz, de modo a não aquecer demasiado o vinho, o que pode levar a que este fique azedo [19].

Quanto aos equipamentos elétricos, os dados de consumo e de perfis de utilização foram fornecidos pelo cliente que já possui um edifício semelhante ao estudado neste trabalho. Os equipamentos elétricos foram inseridos nos quartos, na cozinha e na adega, sendo que na adega estes apenas seriam utilizados nos meses da vindima, setembro e outubro (Tabela 4.2). Os perfis diários de utilização dos equipamentos elétricos nas diferentes divisões encontram-se representados na Figura 4.3 – Perfis de utilização dos equipamentos elétricos das diferentes divisões do edifício em estudo., estando estes em percentagens do valor absoluto presente na Tabela 4.2. Na cozinha foram ainda inseridos os ganhos internos provenientes da utilização dos diferentes equipamentos de cozinha para a preparação das refeições (Tabela 4.3) [20].

Tabela 4.2 – Potência dos equipamentos elétricos instalados nas diferentes divisões e o seu respetivo período de utilização.

Divisões	Potência Equipamentos (W)	Período de utilização
Quartos dos proprietários e <i>staff</i>	1376	365 dias
Quartos para turismo rural	1376	Fins-de-semana, feriados e meses de verão (junho a setembro)
Restaurante	8194	Fins-de-semana, feriados e meses de Verão (junho a setembro)
Adega	53 280	Meses da vindima (setembro e outubro)

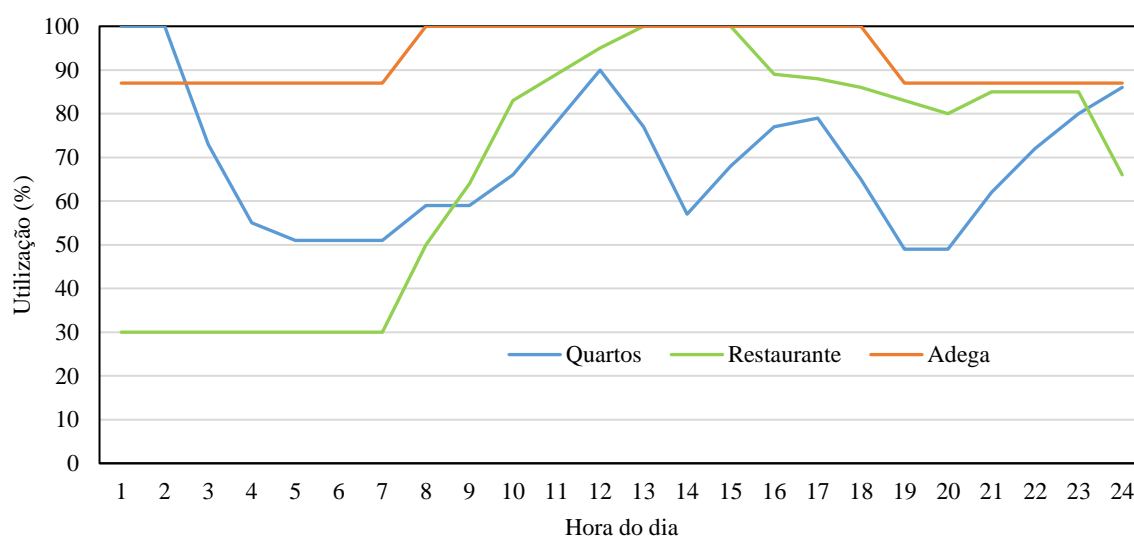


Figura 4.3 – Perfis de utilização dos equipamentos elétricos das diferentes divisões do edifício em estudo.

Tabela 4.3 – Ganhos de calor sensível provenientes da utilização dos equipamentos de cozinha.

Equipamentos de cozinha	Ganhos de calor sensível (W)
Forno de convecção	1670
Grelha	1540
Fogão (6 bocas)	5790
Fritadeiras	700

Sabendo que o edifício também se destina ao turismo rural e à habitação dos proprietários e do *staff*, foi necessário simular um sistema de aquecimento de águas sanitárias. Para este sistema foi definido um consumo diário de água quente de 40 litros por pessoa. Tendo em conta que a temperatura média da água dos banhos é de 40°C, neste sistema a água é aquecida até aos 43°C, de modo a contabilizar com as perdas térmicas na sua distribuição e no seu armazenamento [21].

Para a climatização do edifício foi utilizado o objeto *IdealLoadsAirSystem*, permitindo este obter a carga de climatização para que sejam atingidos os parâmetros de conforto nas diferentes divisões. Para este

sistema foi utilizado um *setpoint* entre os 20°C e os 25°C, sendo este o intervalo de conforto térmico dos ocupantes. Foi definido que as únicas áreas climatizadas seriam os quartos, o restaurante e a receção, sendo a climatização do edifício feita com recurso a um sistema de bomba de calor. Este sistema seria também utilizado para o aquecimento das águas quentes sanitárias definidas anteriormente.

Finalmente, foi definida uma taxa de infiltração de 0.5 RPH em todas as divisões do edifício, através do objeto *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*. Nesta fase inicial, não foi definido nenhum sistema de ventilação natural do edifício, pelo que este apenas será definido posteriormente como medida de redução dos consumos de energia elétrica do edifício.

4.2. Resultados obtidos

Após a definição do modelo de simulação da adega, procedeu-se à sua simulação através do *software EnergyPlus*, com o intuito de obter o consumo anual de energia elétrica do edifício. Para esta simulação foi utilizado o ficheiro climático obtido através do *software* do LNEG, tal como descrito no capítulo 3.1.

Para a obtenção dos consumos do sistema de climatização foi calculado um COP dinâmico através dos seguintes dados e equações [22]:

Tabela 4.4 – Dados necessários para o cálculo do COP dinâmico da bomba de calor utilizada no sistema de climatização.

	Aquecimento	Arrefecimento
T_{dist} [°C]	50	0
T_{cond} [°C]	$T_{dist} + 5$	$T_{exterior} + 5$
T_{evap} [°C]	$T_{exterior} - 5$	$T_{dist} - 5$
η_{bomba} [%]	20	

$$COP_{aquecimento} = \eta_{bomba} \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad (4.1)$$

$$COP_{arrefecimento} = \eta_{bomba} \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad (4.2)$$

Os consumos horários do edifício respetivos à iluminação e à utilização dos diferentes equipamentos foram obtidos diretamente através de um *output* do modelo de simulação. Para o cálculo do consumo horário do sistema de climatização, apenas foi necessário dividir a carga de climatização horária pelo respetivo COP. O consumo de energia elétrica referente ao aquecimento das águas quentes sanitárias foi obtido através da divisão das necessidades de energia térmica do sistema de AQS pelo COP de aquecimento da bomba de calor. Através destes processos, obteve-se um consumo anual de energia elétrica do edifício de aproximadamente 206 MWh, com a seguinte distribuição:

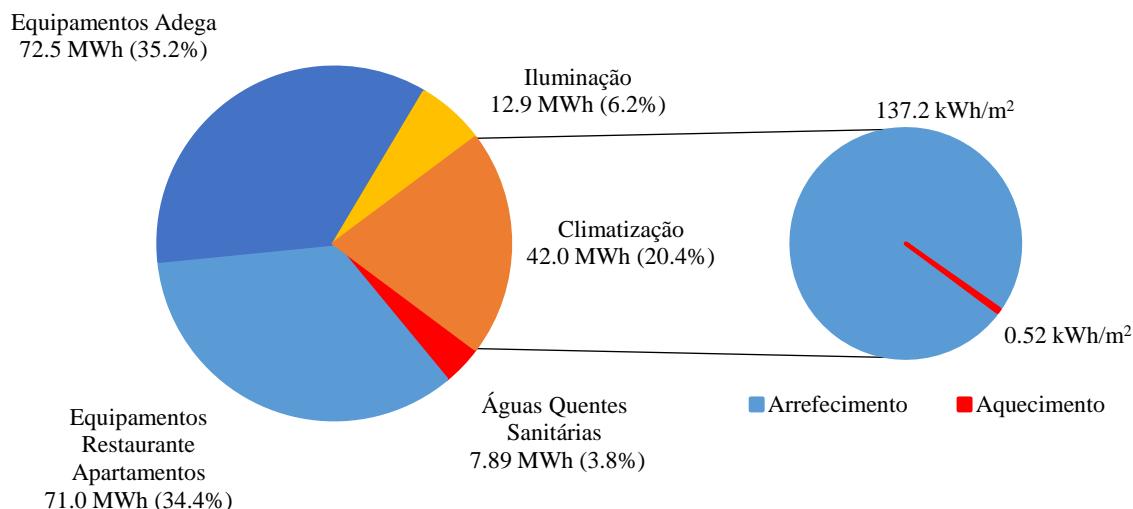


Figura 4.4 – Distribuição percentual dos diferentes consumos de energia elétrica do edifício (esquerda) e respetivos valores dos consumos do sistema de climatização do edifício (direita).

Como se pode verificar na Figura 4.4, o consumo de energia elétrica dos equipamentos é responsável por mais de dois terços do consumo anual do edifício. No caso do consumo de energia elétrica dos equipamentos da adega, este é o maior valor de consumo do edifício, mesmo utilizando os equipamentos durante apenas dois meses. No entanto, os equipamentos utilizados neste modelo são os equipamentos necessários para o bom funcionamento do edifício, pelo que não será possível aplicar medidas de redução dos consumos energéticos a estas duas frações do consumo do edifício.

Analisando o consumo anual do sistema de climatização, é possível verificar que este é um setor com consumos energéticos excessivos, nomeadamente no arrefecimento. Este resultado não seria expectável tendo em conta os resultados da Figura 3.2 e a análise realizada ao clima da vila Madalena, onde se verificou que a temperatura exterior era superior ao intervalo de conforto térmico em apenas 3,5% das horas de um ano. No entanto, quando são inseridos os ganhos de calor internos no edifício é registado um aumento na temperatura interna, levando a que apenas se atinjam os níveis de conforto térmico no edifício quando a temperatura exterior se encontra perto da temperatura mínima mensal. Para além da introdução dos ganhos internos, o edifício possui uma inércia térmica elevada e não apresenta qualquer sistema de ventilação natural no edifício. Estes dois fatores conjugados permitem uma manutenção de níveis de temperatura interior elevados durante mais tempo, contribuindo para o aumento da carga de arrefecimento do edifício.

4.3. Aplicação de medidas de redução do consumo de energia

Concluído o cálculo do consumo anual de energia elétrica do edifício, foi realizado um estudo de aplicação de medidas de redução destes consumos. Este estudo foi efetuado com o intuito de tornar o edifício o mais eficiente possível e de diminuir a dimensão e, consequentemente, o custo do sistema energético *off-grid*.

Tal como referido anteriormente, não é possível aplicar este tipo de medidas de redução dos consumos energéticos do edifício no setor dos equipamentos, restando apenas os setores da iluminação, climatização e águas quentes sanitárias.

No modelo de simulação, a iluminação já foi definida para se encontrar desligada quando é possível garantir um valor de iluminância de 300 lux através da iluminação natural. Por esta razão, os sistemas de iluminação utilizados já são o mais eficientes possível e, portanto, não podem ser aplicadas medidas de redução dos consumos energéticos a este setor.

Quanto ao sistema de AQS, também não é possível aplicar este tipo de medidas visto não ser viável aquecer a água a uma temperatura mais baixa do que a definida. O aquecimento da água a uma temperatura mais baixa não permitia que a água consumida tivesse, no mínimo, uma temperatura de 40°C, sendo esta a temperatura média da água dos banhos [21].

Não sendo possível aplicar medidas de redução dos consumos de energia elétrica aos setores anteriormente descritos, resta apenas realizar um estudo de aplicação destas medidas no setor da climatização. Através dos consumos de energia elétrica do edifício, é possível verificar que este setor apresenta um consumo excessivo na componente de arrefecimento (Figura 4.5)

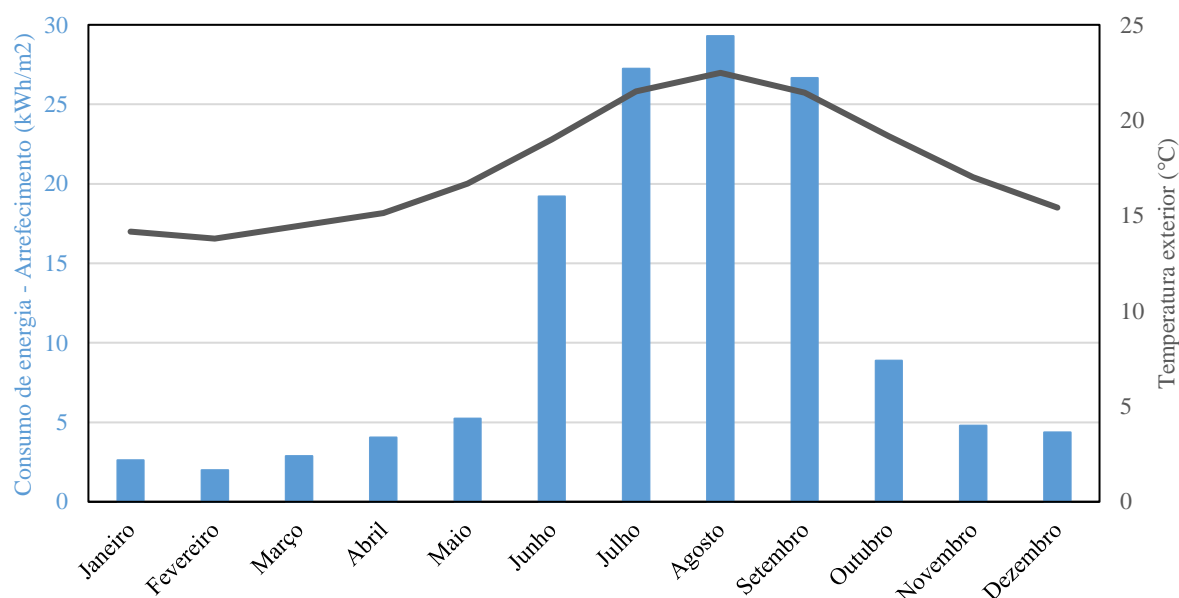


Figura 4.5 – Consumo mensal de energia elétrica referente ao arrefecimento do edifício (barras azuis) e temperatura exterior média mensal da vila Madalena (linha cinzenta).

De notar que o edifício está inserido num clima mais ameno, o que permite uma ventilação natural do edifício de forma a reduzir a carga de arrefecimento do sistema de climatização. Tal facto pode ser verificado através da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, onde se encontram representados o consumo mensal de energia elétrica referente ao arrefecimento e a temperatura média

exterior. Nesta figura não existem dados em relação ao consumo de aquecimento pois este é residual quando comparado com o consumo de energia referente ao arrefecimento do edifício. Através da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é possível verificar que, até para os meses com um maior consumo de energia referente ao arrefecimento, a temperatura exterior ronda os 22.5°C. Mesmo que esta temperatura exterior não seja muito baixa já permite uma ventilação natural do edifício, diminuindo deste modo o consumo de energia do sistema de climatização. Para os meses mais frios pode ser feita, na mesma, a ventilação natural do edifício, visto que a temperatura média exterior ronda os 14.5°C, não causando desconforto aos ocupantes pela entrada de ar a uma temperatura muito baixa.

Após esta análise preliminar dos setores onde se poderiam aplicar as medidas de redução dos consumos energéticos, optou-se por estudar o impacto cumulativo de duas medidas no setor da climatização: a ventilação natural do edifício e o seu arrefecimento noturno.

Para a ventilação do edifício definiu-se que os vãos envidraçados seriam do tipo oscilo batente, permitindo, assim, uma abertura das janelas pela parte superior (Figura 4.6). As janelas poderão ser abertas nos quartos, na receção e no restaurante desde que estas divisões se encontrem ocupadas. Para este estudo foi definida como abertura máxima das janelas uma abertura de 10 cm, o que em termos de área se traduz numa fração de 2% da área de pavimento destas zonas.

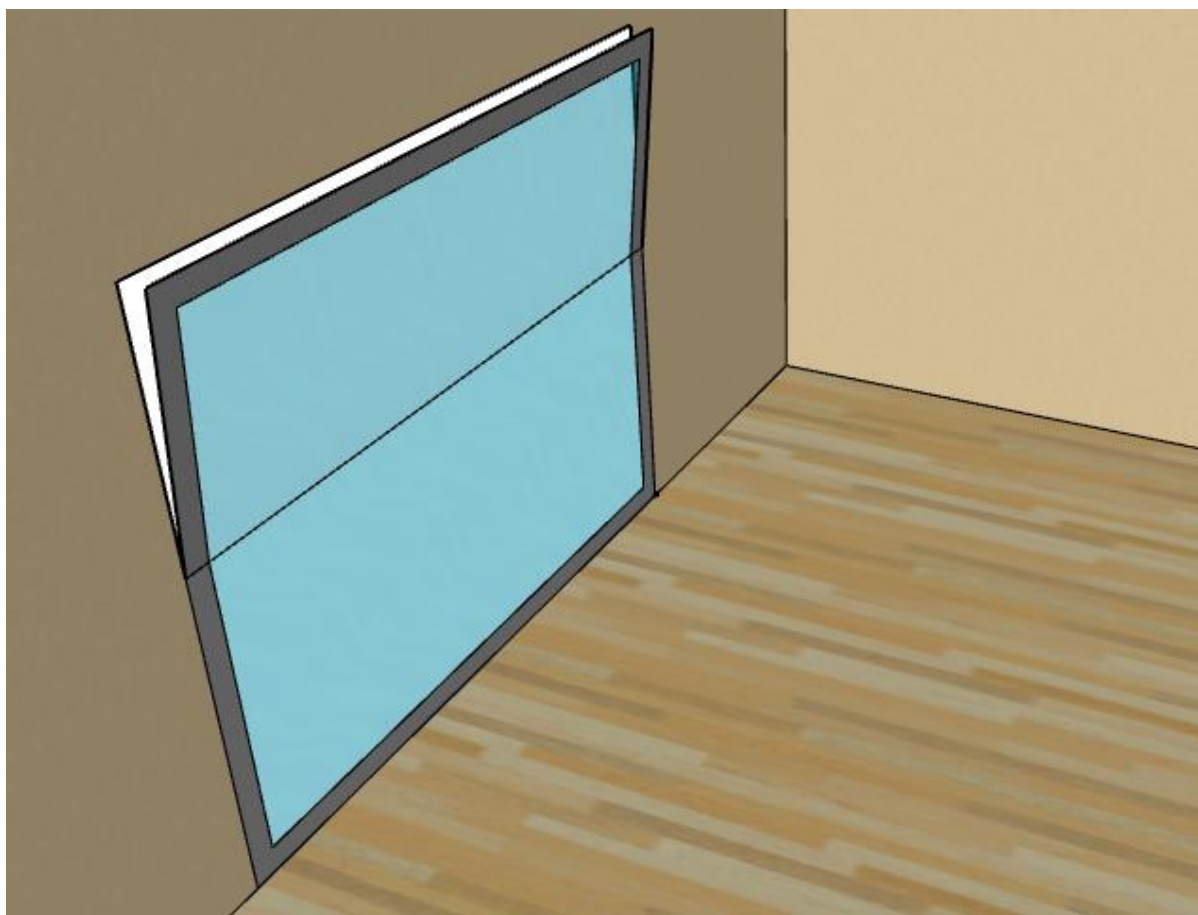


Figura 4.6 – Ilustração do esquema de abertura das janelas do edifício em estudo.

De modo a reduzir os consumos de climatização do edifício procedeu-se à implementação de um sistema de ventilação natural no modelo de simulação previamente definido.

Tendo como objetivo a redução da carga de arrefecimento do edifício, as janelas seriam abertas apenas se as zonas se encontrassem ocupadas e a temperatura interior estivesse entre os 22°C e os 25°C. O limite mínimo para a temperatura interior serve para prevenir o sobrearrefecimento das zonas ocupadas, o que resultaria num aumento da carga de aquecimento do edifício. Por outro lado, o limite máximo para a temperatura interior serve para evitar a abertura das janelas em simultâneo com o funcionamento do sistema de climatização.

Para além dos limites definidos para a temperatura interior, as janelas só seriam abertas se a temperatura exterior fosse inferior à interior, para promover o arrefecimento passivo do edifício. É de acrescentar, também, que só seria possível a ventilação natural do edifício se a temperatura exterior fosse superior aos 17°C nos meses mais frios e aos 15°C nos meses mais quentes, prevenindo o sobrearrefecimento do mesmo.

Aliado à ventilação natural do edifício, foi também estudado o impacto do seu arrefecimento noturno no consumo anual de energia elétrica. O arrefecimento noturno combinado com a inércia térmica do edifício permite manter uma temperatura interior mais reduzida durante mais tempo, ao longo do período da manhã. Esta consequência do arrefecimento noturno permite manter o conforto térmico dos ocupantes durante mais tempo, sem que seja necessário o uso do sistema de climatização. Esta medida apresenta os mesmos limites que foram definidos anteriormente, no entanto, as janelas apenas teriam uma abertura máxima de 5 cm, prevenindo o sobrearrefecimento do edifício.

Após a definição das duas medidas de redução dos consumos energéticos no modelo de simulação, procedeu-se à análise do seu impacto no consumo anual de energia elétrica do edifício (Figura 4.7)

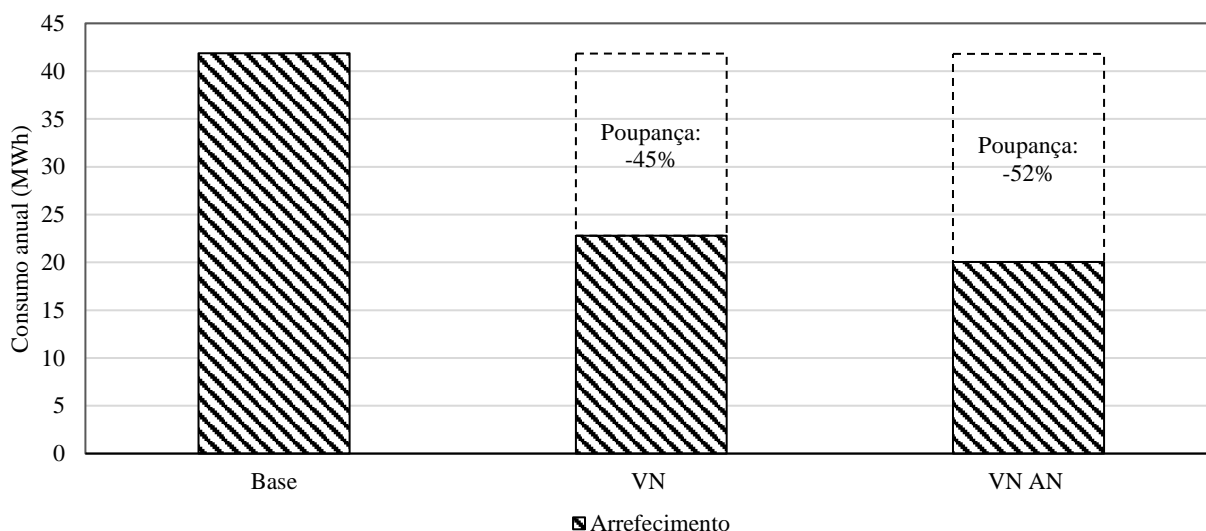


Figura 4.7 – Consumo anual de energia elétrica referente ao arrefecimento do edifício consoante os diferentes cenários de medidas de redução dos consumos energéticos estudadas.

Na Figura 4.7 encontram-se representados os consumos anuais referentes ao arrefecimento do edifício para os diferentes cenários definidos anteriormente. O cenário base diz respeito ao cenário do edifício sem aplicação de medidas de redução dos consumos energéticos. O cenário VN diz respeito ao edifício com ventilação natural e o cenário VN AN diz respeito ao edifício com ventilação natural e arrefecimento noturno. Nesta figura não se encontra representado o consumo do sistema de climatização referente ao aquecimento visto que este é residual face ao consumo anual referente ao arrefecimento.

Como é possível verificar através da Figura 4.7, a utilização de ventilação natural no edifício permite uma redução do consumo de energia elétrica, referente ao arrefecimento, de aproximadamente metade. Aliando o arrefecimento noturno à ventilação natural torna-se possível atingir uma redução de mais de metade deste setor do consumo, que se traduz numa diminuição dos consumos anuais de energia elétrica de aproximadamente 22 MWh.

Além da redução do consumo de energia elétrica do edifício estas duas medidas estudadas possuem também um impacto positivo no conforto dos ocupantes. A ventilação natural permite a entrada de ar novo no edifício, levando à renovação do ar nas diferentes divisões. Esta renovação possibilita a remoção dos poluentes do ar, contribuindo, deste modo, para o aumento da qualidade do ar e conforto dos ocupantes.

Pode-se então concluir que, em termos energéticos e do conforto dos ocupantes, o cenário favorável para o edifício é o cenário que permite a ventilação natural e o arrefecimento noturno. Após a aplicação destas medidas, foi feito novamente o cálculo do consumo anual de energia elétrica do edifício, obtendo-se um valor de aproximadamente 184 MWh (Figura 4.8).

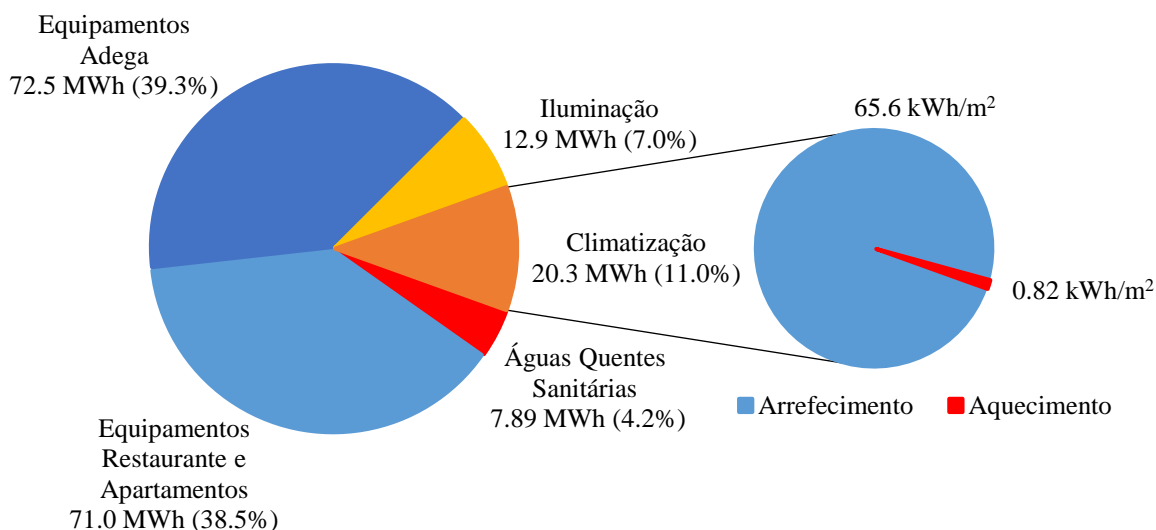


Figura 4.8 – Distribuição percentual dos diferentes consumos de energia elétrica do edifício após a aplicação das medidas de redução dos consumos energéticos (esquerda) e respetivos valores dos consumos de climatização do edifício (direita).

Analisando a Figura 4.8, é possível constatar que mesmo com uma redução da carga de arrefecimento do edifício, este continua a apresentar um valor de consumo referente ao arrefecimento do edifício elevado face ao valor referente ao aquecimento. Tal resultado pode dever-se ao facto de o edifício possuir uma elevada inércia térmica, o que dificulta a redução dos níveis de temperatura interior nas diferentes divisões.

5. Dimensionamento do sistema energético

Após o cálculo do consumo de energia elétrica do edifício em estudo, procedeu-se ao dimensionamento do sistema energético segundo diferentes cenários, inclusive a ligação do edifício à rede elétrica nacional. A avaliação de diferentes cenários tem como objetivo a obtenção do cenário economicamente favorável à adega da Ilha do Pico. Os dimensionamentos foram efetuados com recurso ao *software HomerPro*, versão 3.11.5.

5.1. Configuração do sistema energético

O presente estudo tem como objetivo o dimensionamento de um sistema energético para suprir todas as necessidades energéticas do edifício, tornando-o autossustentável. Para que seja possível atingir este objetivo, primeiramente é necessário escolher quais os componentes que poderão fazer parte deste sistema energético.

Deste modo, analisando a arquitetura do edifício, verifica-se que este possui uma área de cobertura considerável, o que se apresenta como uma vantagem para a instalação de painéis solares fotovoltaicos.

A instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura permite que estes não sejam sombreados por obstáculos que se encontrem na envolvente do edifício, maximizando a sua produção. O facto de os painéis estarem instalados na cobertura possibilita também que estes produzam energia no mesmo local onde se encontra o edifício, reduzindo assim as perdas energéticas no transporte de energia até à carga. Para além disso, os painéis solares fotovoltaicos são tecnologias renováveis que não consomem combustíveis fósseis e não emitem poluentes nem gases de efeito estufa para atmosfera. Por estas razões, os painéis solares fotovoltaicos foram o primeiro componente escolhido para o sistema energético, pois não só permitem gerar energia *in situ*, como também contribuem para uma melhoria do ambiente.

Para além da instalação dos painéis fotovoltaicos, foi também estudada a instalação de turbinas eólicas no sistema energético híbrido da adega da Ilha do Pico. No entanto, as turbinas eólicas possuem um menor tempo de vida útil e maiores custos quando comparadas com os painéis solares fotovoltaicos. Para além disso, e, tendo em conta os valores de consumo de energia elétrica do edifício, seria necessário a instalação de turbinas eólicas com potências elevadas, o que significa que as turbinas eólicas seriam de grandes dimensões. Devido às suas características, as turbinas eólicas apresentariam um maior desafio de inserção na arquitetura e na paisagem do edifício, sendo esta uma das maiores preocupações do cliente. Por estas razões, optou-se por não instalar turbinas eólicas no sistema energético híbrido do edifício em estudo.

Atendendo ao facto que os painéis solares fotovoltaicos são de produção variável no tempo, é necessário o uso de baterias para garantir uma maior estabilidade do sistema energético. Em alturas de excesso de produção, este excesso pode ser armazenado em baterias e, posteriormente, utilizado durante alturas de menor produção ou durante a noite, período em que não existe produção fotovoltaica.

Para o sistema energético em estudo optou-se pela utilização de baterias de ião lítio. Estas foram as baterias escolhidas pois permitem maiores percentagens de descarga, em comparação com as baterias convencionais. As baterias de ião lítio apresentam, ainda, um maior número de ciclos de vida, permitindo que funcionem durante mais tempo sem ser necessária a sua substituição. Assim sendo, mesmo apresentando custos mais elevados, estas baterias necessitam de ser substituídas menos vezes ao

longo do tempo de vida útil do sistema energético, resultando num menor custo total destas componentes.

Tendo em conta que os painéis fotovoltaicos produzem energia em corrente contínua e que as baterias também operam num regime de corrente contínua, é necessária a instalação de inversores no sistema energético. Os inversores permitem a conversão de energia em corrente contínua para energia em corrente alternada, ou vice-versa. Como a carga do edifício é de corrente alternada, os inversores são uma componente imprescindível do sistema energético híbrido da adega.

Visto que o edifício não se encontra conectado à rede elétrica nacional, é também necessário que o seu sistema energético possua geradores convencionais. A utilização de geradores convencionais conduz a um aumento da fiabilidade do sistema energético, devido ao facto de estes apresentarem uma garantia de potência. Ao contrário dos geradores de produção variável no tempo, a produção dos geradores convencionais não depende da variabilidade dos recursos. Assim sendo, estes geradores podem sempre ser utilizados para suprir as necessidades energéticas do edifício, apresentando uma garantia de produção. Os geradores escolhidos para este sistema são geradores a *diesel*.

Na Figura 5.1 encontra-se o esquema da configuração do sistema energético híbrido utilizado neste estudo.

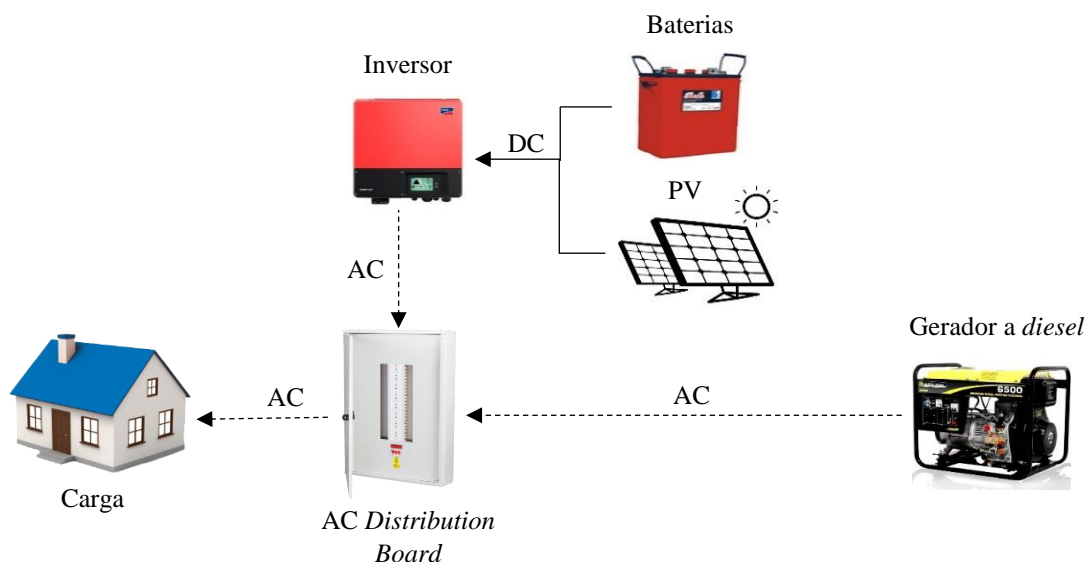


Figura 5.1 – Configuração do sistema energético do edifício em estudo.

Após a escolha dos componentes que fariam parte do sistema energético híbrido dimensionado através do *software HomerPro*, foi realizado um estudo de modo a averiguar a capacidade máxima de painéis fotovoltaicos que podem ser instalados no edifício. Os painéis solares utilizados neste estudo são do modelo *X-Series* da marca *SunPower*. Estes painéis possuem uma potência nominal de 335 Wp e um rendimento de 21.1%.

Para o cálculo da melhor inclinação dos painéis solares, foi feita uma análise com recurso ao programa *EnergyPlus* da produção de um painel, orientado a Sul, consoante diferentes inclinações. Através desta análise foi possível verificar que a inclinação ótima dos painéis é de 30°, levando a uma produção anual de aproximadamente 444 kWh. No entanto, esta inclinação não é a mais vantajosa para os painéis instalados na cobertura, visto levar a um maior sombreamento dos painéis que estão por trás, diminuindo assim o número máximo de painéis que podem ser instalados.

Com o intuito de maximizar a potência instalada na cobertura do edifício, optou-se por utilizar os painéis solares com uma inclinação de 5°. Esta opção leva a uma diminuição da produção anual de cada painel, mas permite uma instalação de mais painéis, pelo que a produção total dos painéis com esta inclinação é superior à produção total dos painéis com uma inclinação de 30°. A utilização de uma inclinação de 5° permite ainda uma melhor inserção dos painéis na cobertura do edifício, sendo esta uma das maiores preocupações do cliente. Na zona do restaurante a cobertura é praticamente plana e, na zona da adega, esta possui duas águas com orientação Norte-Sul com uma inclinação de aproximadamente 5°, pelo que os painéis serão facilmente inseridos na arquitetura destas zonas.

Para além dos painéis solares fotovoltaicos na cobertura, foi também feita uma análise da instalação destes num parque de estacionamento ao ar livre, perto do edifício. O parque de estacionamento possui 20 lugares e permite que tenha uma cobertura com uma inclinação de 30°, levando assim à instalação de painéis solares com a sua inclinação ótima [23].

Após esta análise verificou-se que é possível instalar painéis solares fotovoltaicos numa área de aproximadamente 1075 m², que se traduz numa potência de 208 kWp. A forma como estes podem ser instalados no edifício encontra-se presente na Figura 5.2. De notar que no resto da cobertura não foram instalados painéis solares, pois esta encontra-se orientada a Norte e possui uma inclinação significativa, pelo que a produção dos painéis seria mais reduzida.

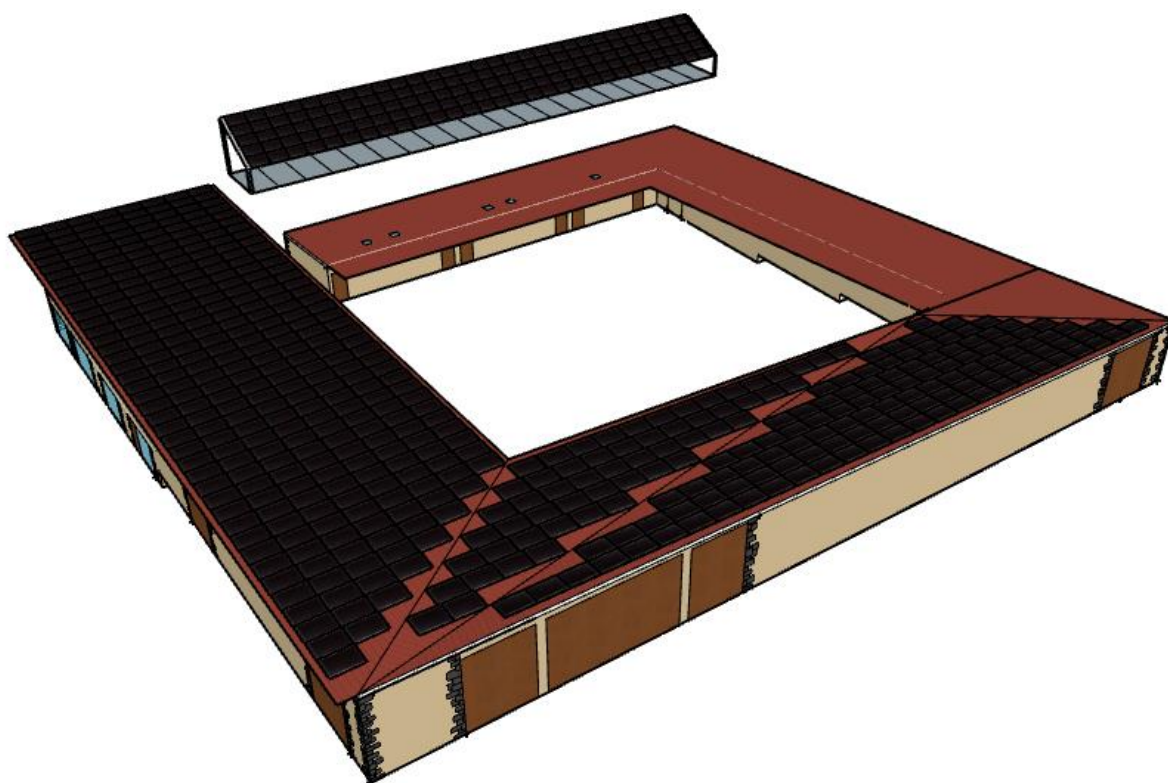


Figura 5.2 – Modelo 3D do edifício em estudo com a instalação de painéis solares fotovoltaicos na sua cobertura e no seu parque de estacionamento.

5.2. Cenários analisados

Com o objetivo de obter o cenário economicamente favorável à adega da ilha do Pico, o dimensionamento do sistema energético foi realizado através de dois critérios diferentes.

O primeiro critério utilizado foi a realização do dimensionamento para todos os consumos energéticos do edifício. Para este caso, o *software HomerPro* dimensiona o sistema energético do edifício tendo por base o consumo de energia elétrica de todos os setores do edifício, tal como apresentado no capítulo 4.3. Os perfis de consumo necessários suprir com o sistema energético dimensionado através deste critério encontram-se na Figura 5.3.

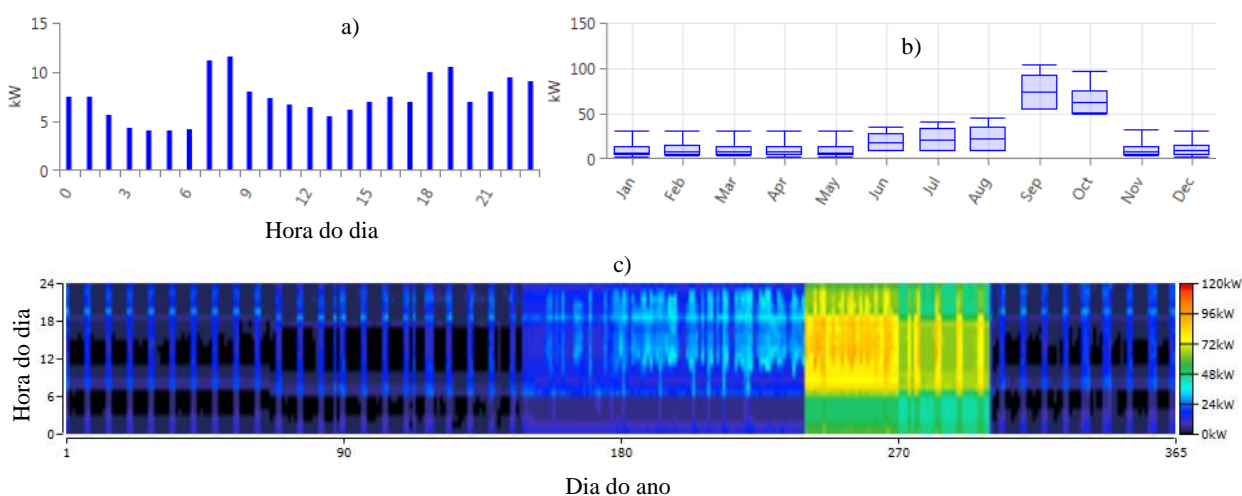


Figura 5.3 – Perfis de consumo necessários suprir com o sistema energético híbrido dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento, obtidos através *software HomerPro*:

a) Perfil diário

b) Perfil Sazonal

c) Perfil Anual

Para o segundo dimensionamento foi efetuada uma divisão dos consumos de energia elétrica em dois setores principais: o setor dos apartamentos, restaurante e receção; e o setor da adega. Os consumos de energia elétrica do setor dos apartamentos, restaurante e receção seriam então supridos através de um sistema energético híbrido *off-grid*, enquanto os consumos de energia do setor da adega seriam supridos apenas através de geradores *diesel*. Os perfis de consumo necessários suprir com o sistema energético dimensionado através deste critério encontram-se na Figura 5.4.

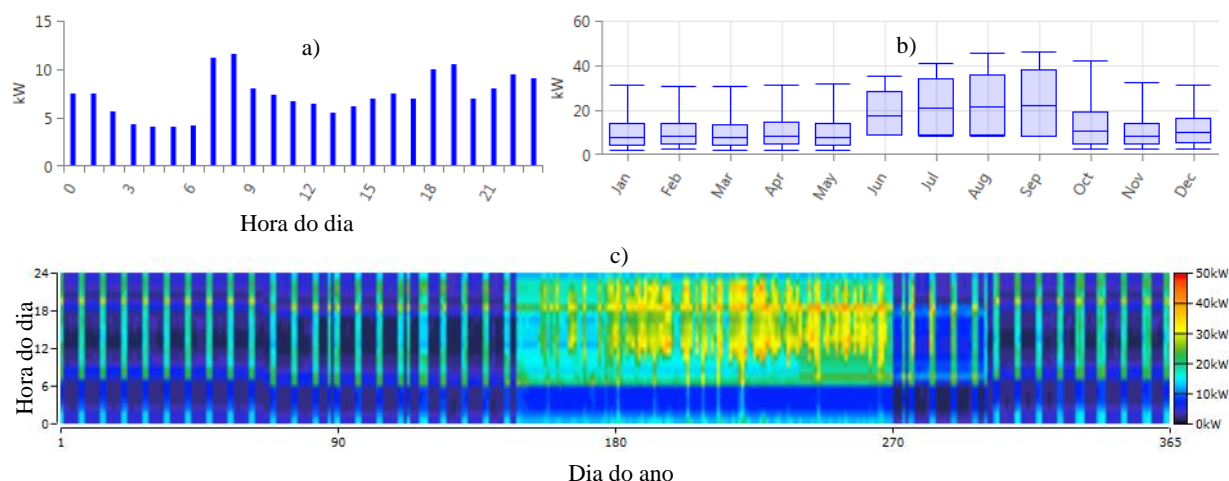


Figura 5.4 – Perfis de consumo necessários suprir com o sistema energético híbrido dimensionado através do segundo critério de dimensionamento, obtidos através *software HomerPro*:

a) Perfil diário

b) Perfil Sazonal

c) Perfil Anual

Além dos diferentes critérios de dimensionamento acabados de referir, foram também analisados três diferentes cenários para cada um dos dimensionamentos do sistema energético do edifício.

O primeiro cenário analisado foi o do sistema energético dimensionado a funcionar durante 25 anos. Esta primeira análise tem por base avaliar o comportamento e todos os custos de um sistema energético híbrido *off-grid* para o edifício em estudo.

O segundo cenário estudado foi o do sistema energético a funcionar durante 15 anos, e, posteriormente, uma ligação do edifício à rede elétrica nacional nos 10 anos seguintes. Tendo em conta o tempo de vida útil das baterias de ião lítio e o facto de o seu custo de substituição ser elevado, este cenário serve para analisar o custo do sistema energético sem que seja necessário a substituição das baterias. Além disso, durante os 10 anos em que o edifício se encontra conectado à rede elétrica nacional, os geradores convencionais também deixam de ser utilizados de forma a reduzir o consumo de *diesel* do sistema. Assim sendo, nos últimos 10 anos do sistema, apenas é possível recorrer-se à produção dos painéis fotovoltaicos ou à rede elétrica para suprir os consumos de energia elétrica do edifício.

Finalmente, o terceiro cenário analisado foi o da ligação à rede elétrica nacional durante 25 anos. Este cenário serve como base para verificar se a implementação de um sistema energético híbrido *off-grid* é economicamente vantajoso para o edifício.

Através dos cenários avaliados e dos critérios utilizados no dimensionamento foi possível obter diferentes configurações para o sistema energético da adegas. No entanto, apenas se considerou a configuração que apresentava menores custos de modo a obter o cenário economicamente favorável ao edifício em estudo.

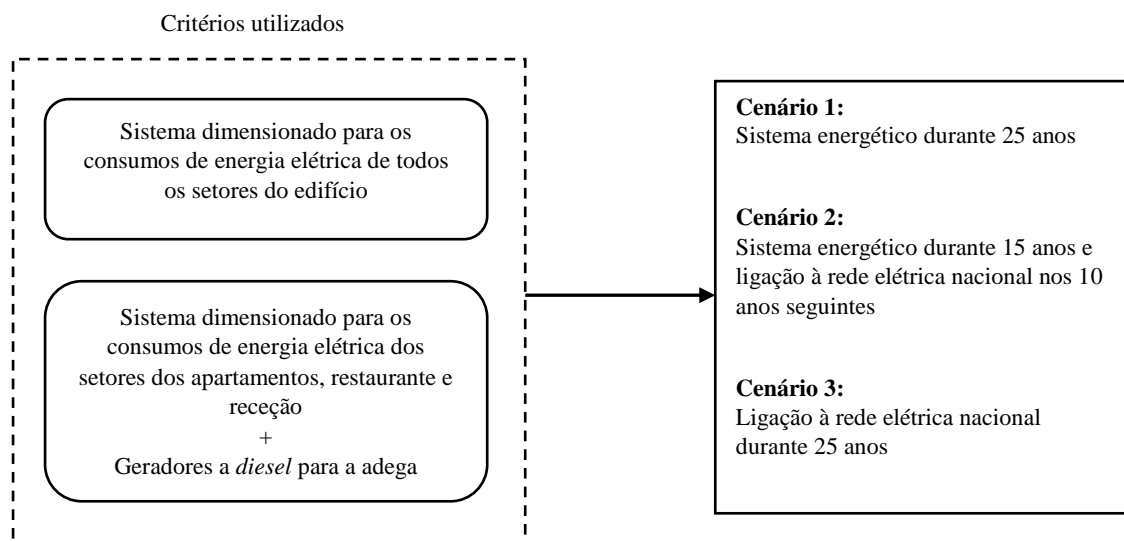


Figura 5.5 – Esquema dos critérios de dimensionamento utilizados e respetivos cenários analisados

5.3. Resultados Obtidos

Após a definição dos cenários que serão analisados para o dimensionamento do sistema energético, é necessário definir os custos dos diferentes componentes do sistema assim como algumas das suas características mais importantes. A definição destes parâmetros revela-se de grande importância, tendo em conta que o objetivo deste estudo é o dimensionamento do sistema energético que acarreta menores custos para o cliente.

Tendo em conta que o Governo Regional dos Açores financia projetos deste tipo, é possível obter uma participação de 75% do valor do investimento inicial, o que significa que o cliente apenas precisa de pagar 25% deste custo. No entanto, esta participação só se aplica mesmo ao investimento inicial, pelo que, em caso de substituição dos componentes, o cliente terá de pagar o seu custo total sem qualquer participação.

Para este estudo, os painéis solares fotovoltaicos utilizados são do modelo *X-Series* da marca *SunPower*. Os painéis são de cor preta o que facilita a sua integração na arquitetura do edifício, sendo esta uma das maiores preocupações do cliente. Estes painéis possuem uma potência nominal de 335 Wp, uma área de aproximadamente 1.6 m² e uma eficiência de 21.1%. Quanto aos outros componentes do sistema energético – geradores a *diesel*, baterias de ião lítio e inversor – foram utilizados os objetos genéricos presentes na biblioteca do *HomerPro*.

Através da base de dados do *HomerPro* foi possível obter os custos dos diferentes constituintes do sistema, assim como o seu tempo de vida útil (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Diferentes custos e respetivo tempo de vida útil dos componentes utilizados para o dimensionamento do sistema energético do edifício em estudo.

Componentes	Custo Inicial	Custos de Substituição	Custos de Operação e Manutenção	Tempo de vida
Painéis Fotovoltaicos	0.5 €/Wp	2 €/Wp	10% do custo inicial sem comparticipação	25 anos
Gerador	125 €/kW	500 €/kW	0.03 €/hora operação	15 000 horas
Baterias	150 €/kWh	600 €/kWh	10 €/ano	15 anos
Inversor	75 €/kW	300 €/kW	-	15 anos

Além dos custos do gerador a *diesel* presentes na Tabela 5.1 é também preciso ter em conta o custo do seu combustível, apresentando este um valor de 0.69 €/l.

Neste estudo é preciso ter em conta o custo da extensão à rede elétrica nacional para averiguar qual dos cenários é favorável ao edifício. Neste caso, considerou-se um custo de 100 000€ para a ligação do edifício à rede elétrica. De notar que este custo não é comparticipado, pelo que se inicialmente se optar pela extensão à rede elétrica em vez da instalação de um sistema energético híbrido este custo passa a ser de 25 000€, tendo em conta a comparticipação de 75%.

Para a obtenção dos custos totais do sistema dimensionado através dos cenários 2 e 3 é também necessário definir o custo da eletricidade no local onde será construído o edifício. Neste estudo foi aplicada uma tarifa de 0.113 €/kWh à energia consumida através da rede elétrica nacional. Para além disso, foi ainda aplicada uma taxa à potência contratada à rede de 0.04 €/(kW.dia) e um termo diário de 0.9061 €/dia.

Após a definição dos componentes que seriam utilizados e dos seus custos, procedeu-se ao dimensionamento do sistema energético híbrido. O sistema dimensionado apresenta uma configuração igual ao da Figura 5.1.

Para o dimensionamento do sistema energético foi necessário inserir a capacidade máxima de painéis fotovoltaicos que é possível instalar. Através da capacidade máxima de painéis, o *HomerPro* otimiza a potência de painéis instalada, mediante o critério de dimensionamento analisado, de modo a obter o sistema com o custo total mais reduzido. Para os outros componentes não foi necessário inserir a capacidade máxima a instalar, visto não haver qualquer limitação quanto a este parâmetro. A potência instalada destes componentes é também otimizada através do *HomerPro*, sempre com o intuito de obter o sistema energético com custos mais reduzidos.

Os resultados obtidos para os diferentes critérios e cenários de dimensionamento analisados encontram-se presentes nas Tabelas 5.2 e 5.3 e nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

Tabela 5.2 – Capacidade instalada dos componentes do sistema energético dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento e respetivos custos dos cenários analisados.

Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	120 kW	208.5 kW	292 kWh	106 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	170.8 k€ (investimento inicial) + 137.0 k€ (substituição) + 122.8 k€ (operação) + 196.0 k€ (<i>diesel</i>) Custo total do sistema = 626.5 k€			
Cenário 2 (Sistema 15 anos + ligação à rede 10 anos)	170.8 k€ (investimento inicial) + 62.6 k€ (substituição) + 82.3 k€ (operação) + 117.6 k€ (<i>diesel</i>) + 236.8 k€ (eletricidade) Custo total do sistema = 670.1 k€			
Cenário 3 (Ligação à rede 25 anos)	25 k€ (extensão à rede elétrica) + 616.4 k€ (eletricidade) Custo total do sistema = 641.4 k€			

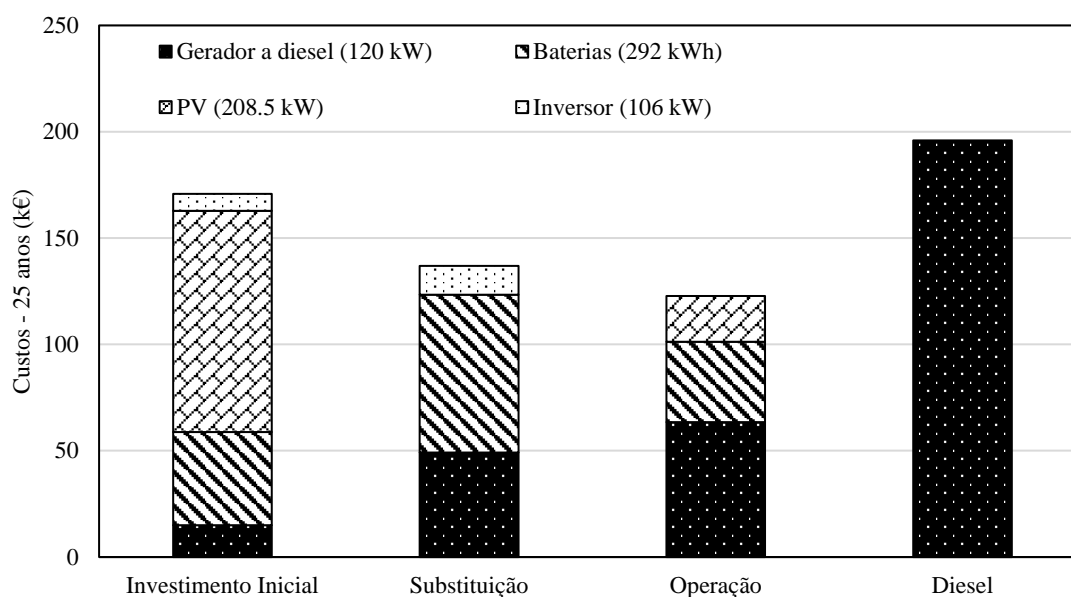


Figura 5.6 – Custo dos componentes do sistema dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento para o primeiro cenário analisado.

Tabela 5.3 – Capacidade instalada dos componentes do sistema energético dimensionado através do segundo critério de dimensionamento e respetivos custos dos cenários analisados.

Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	116 kW	151.6 kW	287 kWh	41.5 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	136.2 k€ (investimento inicial) + 115.5 k€ (substituição) + 105.9 k€ (operação) + 246.4 k€ (<i>diesel</i>) Custo total do sistema = 604.1 k€			
Cenário 2 (Sistema 15 anos + ligação à rede 10 anos)	136.2 k€ (investimento inicial) + 42.5 k€ (substituição) + 69.8 k€ (operação) + 147.9k€ (<i>diesel</i>) + 245.4 k€ (eletricidade) Custo total do sistema = 641.8 k€			
Cenário 3 (Ligação à rede 25 anos)	25 k€ (extensão à rede elétrica) + 616.4 k€ (eletricidade) Custo total do sistema = 641.4 k€			

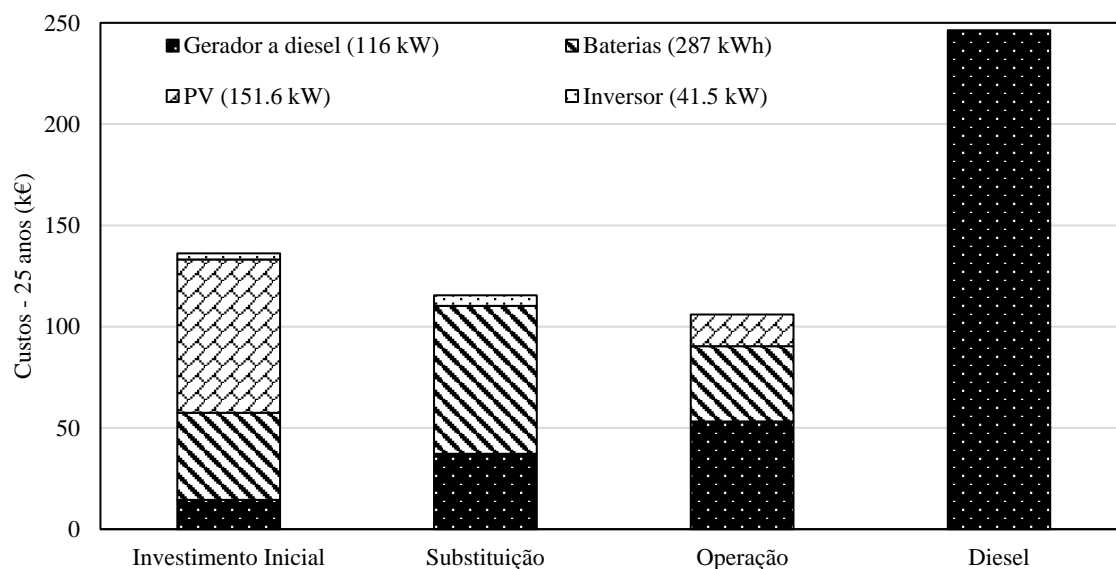


Figura 5.7 – Custos dos componentes do sistema dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para o primeiro cenário analisado.

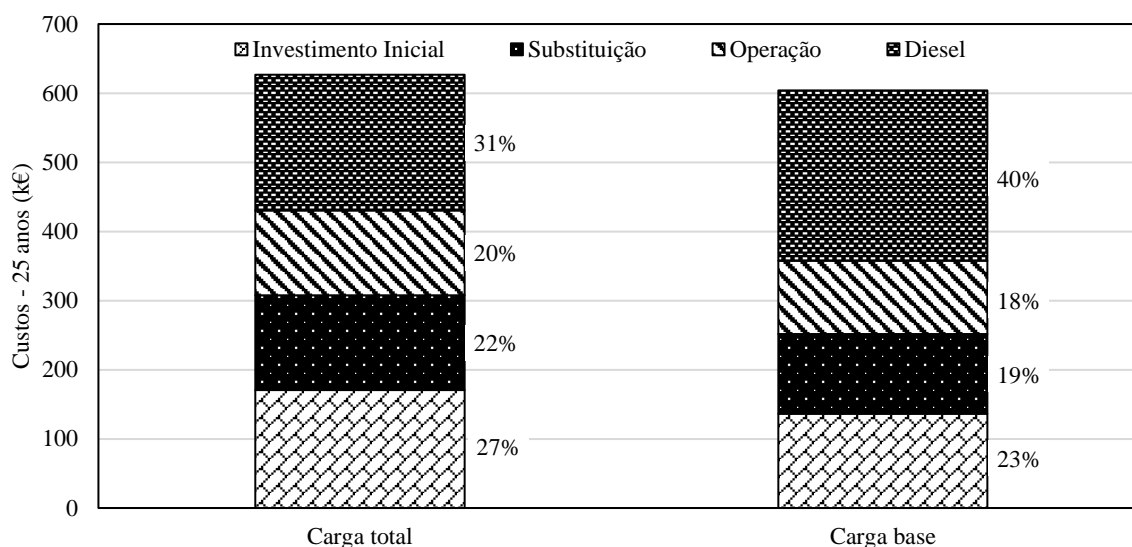


Figura 5.8 – Diferentes custos do sistema energético dimensionado através de ambos os critérios para o primeiro cenário analisado.

Atendendo à capacidade instalada dos diferentes componentes do sistema, é possível observar que apenas existe uma diferença considerável de potência instalada de painéis fotovoltaicos e de inversores, entre ambos os critérios de dimensionamento. Esta diferença deve-se ao facto de a carga do sistema energético híbrido ser diferente consoante o critério de dimensionamento utilizado. Quando há um maior consumo de energia elétrica, o sistema energético necessita de uma maior potência de geradores renováveis para munir toda a sua carga. Atendendo ao facto de os painéis fotovoltaicos produzirem energia elétrica em corrente contínua, é também necessária uma maior potência de inversores para inverter toda a energia produzida pelos painéis para energia em corrente alternada.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3, é possível verificar que existe uma tendência entre os diferentes cenários estudados. O cenário da implantação do sistema energético ao longo dos 25 anos é o que apresenta um menor custo total para ambos os critérios de dimensionamento. O cenário da utilização do sistema energético ao longo de 15 anos e depois a ligação à rede elétrica nos 10 anos seguintes é o que apresenta um maior custo. Tal resultado pode dever-se ao custo da extensão do edifício à rede elétrica nacional, o que consequentemente leva a um elevado custo da eletricidade ao longo dos 10 anos de utilização da rede elétrica. Por fim, o cenário da ligação à rede elétrica nacional ao longo dos 25 anos apresenta um custo que se encontra entre o custo dos dois cenários descritos anteriormente.

Através da Figura 5.6 e da Figura 5.7 – Custos dos componentes do sistema dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para o primeiro cenário analisado, é possível verificar que os geradores a *diesel* são o componente do sistema com maior custo total. Este resultado deve-se aos encargos económicos do seu combustível, sendo que o custo do *diesel* é o custo mais elevado em ambos os sistemas (Figura 5.8). Para além disso, os geradores a *diesel* são o componente que mais necessita de operação e manutenção, contribuindo assim para um aumento dos seus custos totais.

O componente do sistema que apresenta o segundo custo mais elevado são as baterias de ião lítio (Figura 5.6 e Figura 5.7). Para além das baterias serem o componente do sistema com uma maior capacidade instalada, estas também apresentam custos iniciais e de substituição elevados (Tabela 5.1), levando assim a um aumento do custo total dos sistemas.

Analisando os custos dos painéis solares fotovoltaicos pode-se verificar que estes se devem principalmente ao seu investimento inicial (Figura 5.6 e Figura 5.7). O investimento inicial deste componente é o mais elevado de todos em ambos os sistemas, uma vez que os painéis solares são o segundo componente com uma maior capacidade instalada nestes sistemas e também apresentam o custo mais elevado por unidade de capacidade (Tabela 5.1).

Em comparação com os outros componentes, os custos dos inversores são os mais reduzidos para ambos os sistemas. O seu custo mais reduzido deve-se ao facto de estes não necessitarem de manutenção e possuírem os custos de instalação e de substituição mais baixos (Tabela 5.1).

Fazendo uma análise à diferença entre os dois critérios estudados, é possível constatar que o dimensionamento do sistema energético para o consumo base do edifício e a utilização de geradores a *diesel* para a adega é o que apresenta menores custos para o cliente. Este critério, mesmo apresentando custos de consumo de *diesel* mais elevados, possui valores mais reduzidos de investimento inicial, substituição e manutenção, o que leva a que seja o critério com um custo total mais baixo (Figura 5.8).

Finalmente, é possível verificar que o cenário da implantação do sistema energético ao longo de 25 anos dimensionado através do segundo critério apresenta-se como o cenário economicamente favorável ao edifício.

5.3.1. Influência da estratégia de modelação da carga no sistema energético

Para os resultados apresentados na secção anterior a carga foi modelada no *HomerPro* segundo a estratégia de *Load Following*. Tal como foi referido no capítulo 2.4., segundo esta estratégia as baterias são carregadas através do excesso de produção dos geradores renováveis de produção variável no tempo. No entanto, esta estratégia apenas é vantajosa para sistemas de menor dimensão, podendo não ser esse o caso para o sistema em estudo, tendo em conta o consumo anual de energia do edifício [14].

De modo a analisar o impacto da estratégia de modelação da carga no sistema energético obtido, procedeu-se então ao dimensionamento do sistema energético do edifício utilizando a estratégia de modelação de *Cycle Charging*. Para esta análise o sistema energético foi dimensionado através do segundo critério de dimensionamento, sendo este utilizado ao longo de 25 anos – cenário economicamente vantajoso. As características e custos dos componentes utilizados mantiveram-se iguais de forma a analisar somente o impacto da estratégia de modelação da carga no sistema energético (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Capacidade instalada dos componentes e respetivos custos do sistema energético dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para ambas as estratégias de modelação da carga.

Estratégia de Load Following (cenário economicamente vantajoso)				
Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	116 kW	151.6 kW	287 kWh	41.5 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	136.2 k€ (investimento inicial) + 115.5 k€ (substituição) + 105.9 k€ (operação) + 246.4 k€ (diesel) Custo total do sistema = 604.1 k€			
Estratégia de Cycle Charging				
Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	116 kW	137.2 kW	317 kWh	40.1 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	133.6 k€ (investimento inicial) + 114.0 k€ (substituição) + 102.6 k€ (operação) + 264.9 k€ (diesel) Custo total do sistema = 615.1 k€			

Analisando a capacidade dos diferentes componentes é possível verificar que, para uma estratégia de modelação da carga de *Cycle Charge*, existe um maior número de baterias e uma menor potência de painéis fotovoltaicos instalados. Um maior número de baterias deve-se ao facto de os geradores a *diesel* apresentarem níveis de produção energética mais elevados, o que permite um maior armazenamento de energia. A diminuição da potência dos painéis fotovoltaicos está relacionada com o facto de estes geradores serem dimensionados para não haver excesso de produção renovável. Tendo em conta que as baterias são carregadas através dos geradores convencionais, não faz sentido haver excesso de produção renovável. Neste caso, os geradores renováveis são dimensionados para que toda a sua produção seja para autoconsumo.

Através da Tabela 5.4, é possível verificar que a utilização da estratégia de *Cycle Charging* conduz a um menor investimento inicial. A redução deste custo deve-se à redução da capacidade instalada de painéis fotovoltaicos e de inversores. Através da Tabela 5.1 observa-se que os painéis apresentam um custo inicial mais elevado por unidade de potência instalada do que as baterias por unidade de armazenamento. Assim sendo, a redução da potência instalada dos painéis solares consegue contrastar com o aumento do número de baterias, conduzindo a um investimento inicial mais reduzido.

A estratégia de *Cycle Charging* conduz também a menores custos de substituição. Tal resultado deve-se ao facto de os geradores a *diesel* serem substituídos após um certo valor de horas de operação. Segundo a estratégia de *Cycle Charging* as baterias são carregadas através dos geradores a *diesel*, pelo que estes operam quase sempre à sua potência nominal. Operando à sua potência nominal, os geradores apresentam um menor valor de horas de operação, resultando assim numa redução dos custos de substituição do sistema.

Em termos dos custos de operação, a estratégia de *Cycle Charging* é a que apresenta um menor valor. Esta redução advém também do facto de os geradores apresentarem um menor número de horas de operação através desta estratégia, tendo em conta que os custos de operação dependem do número de horas que estes operam (Tabela 5.1). Com esta diminuição do número de horas de operação dos geradores a *diesel* é, então, possível atingir custos de operação mais reduzidos, mesmo havendo um

aumento do número de baterias, que são os componentes com este tipo de custo mais elevado (Tabela 5.1).

Os custos de consumo de *diesel* para o sistema dimensionado, utilizando uma estratégia de modelação da carga de *Cycle Charging*, são os mais elevados. Tendo em conta que segundo esta estratégia as baterias são carregadas através dos geradores convencionais, há um maior consumo de combustível por parte destes, conduzindo a um aumento dos custos do *diesel*.

Analisando os custos de uma forma global, a utilização da estratégia de modelação da carga de *Cycle Charging* apresenta um maior valor dos custos totais do sistema. Este resultado deve-se ao facto de, através do segundo critério de dimensionamento, o sistema energético híbrido ser dimensionado apenas para o consumo base do edifício. Tendo em conta que o consumo de energia elétrica da adega diz respeito a mais de um terço do consumo total do edifício, se este for retirado do dimensionamento é possível obter um sistema energético de menor dimensão. Para sistemas de menor dimensão, a estratégia de modelação da carga vantajosa é a de *Load Following*, levando a que uma alteração desta estratégia resulte num aumento dos custos totais do sistema dimensionado através do segundo critério [14].

De forma a analisar se a estratégia de *Cycle Charging* é mesmo vantajosa para sistemas de maior dimensão, procedeu-se também ao dimensionamento do sistema energético para o consumo total do edifício utilizando as duas estratégias de modelação da carga existentes no *software HomerPro* (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Capacidade instalada dos componentes e respetivos custos do sistema energético dimensionado através do primeiro critério de dimensionamento para ambas as estratégias de modelação da carga.

Estratégia de <i>Load Following</i> (primeiro critério de dimensionamento)				
Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	120 kW	208.5 kW	292 kWh	106 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	170.8 k€ (investimento inicial) + 137.0 k€ (substituição) + 122.8 k€ (operação) + 196.0 k€ (<i>diesel</i>) Custo total do sistema = 626.5 k€			

Estratégia de <i>Cycle Charging</i> (primeiro critério de dimensionamento)				
Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	120 kW	201.5 kW	407 kWh	110 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	184.8 k€ (investimento inicial) + 134.9 k€ (substituição) + 103.1 k€ (operação) + 191.8 k€ (<i>diesel</i>) Custo total do sistema = 614.6 k€			

Analisando os resultados obtidos, é possível verificar que o dimensionamento do sistema energético para o consumo total do edifício, utilizando a estratégia de *Cycle Charging*, leva a um aumento do investimento inicial do sistema. O aumento deste custo está relacionado com o aumento considerável da capacidade instalada de baterias.

Por outro lado, através da estratégia de *Cycle Charging* é possível obter custos de substituição e de operação mais reduzidos, mesmo havendo um aumento da capacidade de baterias e, consequentemente, dos seus custos. Tal resultado deve-se ao facto de segundo esta estratégia, as baterias serem carregadas através dos geradores a *diesel*, conduzindo a que estes funcionem quase sempre à sua potência nominal, reduzindo assim o seu número de horas de operação. Tendo em conta que os custos de operação e de substituição destes geradores do número de horas em que estes operam, estes dois custos são mais reduzidos para a estratégia de *Cycle Charging*.

Não obstante ao resultado anterior, os custos do *diesel* também são mais reduzidos para a estratégia de *Cycle Charging*. Com os geradores a *diesel* a funcionarem durante menos tempo através desta estratégia, há uma redução do consumo de combustível por parte destes, diminuindo assim os seus encargos económicos.

Em termos globais, verifica-se que através da estratégia de *Cycle Charging* é possível obter um sistema energético com menores custos. Tal resultado deve-se ao facto do sistema energético híbrido ser dimensionado para suprir o consumo total do edifício resultando, assim, num sistema de maiores dimensões. Com este resultado é possível verificar que a estratégia de *Cycle Charging* é mais vantajosa para sistemas de maior dimensão.

5.3.2. Impacto das medidas de redução dos consumos energéticos na dimensão do sistema

Após os dimensionamentos dos diferentes cenários, critérios e estratégias de modelação da carga, foi feita uma análise do impacto das medidas de redução dos consumos de energia elétrica do edifício na dimensão do sistema. Estas medidas não só foram aplicadas de modo a tornar o edifício mais eficiente, mas também de forma a reduzir os custos do sistema energético o máximo possível.

Para esta análise utilizou-se o cenário economicamente favorável ao edifício e aplicaram-se os mesmos parâmetros de dimensionamento deste cenário ao consumo do edifício sem a aplicação das medidas dos consumos energéticos (Figura 4.4). A capacidade instalada dos diferentes componentes foi otimizada através do *HomerPro*, sendo apenas necessário inserir a potência máxima de painéis fotovoltaicos que podem ser instalados no local. A estratégia de modelação da carga utilizada foi a de *Load Following* e foram analisados os custos da implementação do sistema energético durante 25 anos (Tabela 5.6)

Tabela 5.6 – Capacidade instalada dos componentes e respetivos custos do sistema energético dimensionado através do segundo critério de dimensionamento para suprir os consumos energéticos do edifício antes e após a aplicação de medidas de redução dos mesmos.

Após aplicação das medidas de redução dos consumos energéticos (cenário economicamente vantajoso)				
Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	116 kW	151.6 kW	287 kWh	41.5 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	136.2 k€ (investimento inicial) + 115.5 k€ (substituição) + 105.9 k€ (operação) + 246.4 k€ (<i>diesel</i>) Custo total do sistema = 604.1 k€			
Antes da aplicação de medidas de redução dos consumos energéticos (consumo base do edifício)				
Componentes	Gerador	PV	Baterias	Inversor
Capacidade Instalada	117 kW	170 kW	366 kWh	44.1 kW
Cenário 1 (Sistema energético 25 anos)	157.1 k€ (investimento inicial) + 136.3 k€ (substituição) + 118.6 k€ (operação) + 252.2 k€ (<i>diesel</i>) Custo total do sistema = 664.2 k€			

Como é possível verificar, os componentes do sistema energético para o edifício sem medidas de redução dos consumos energéticos apresentam uma maior capacidade instalada. A maior diferença reside na potência instalada de painéis fotovoltaicos e também no número de baterias dos sistemas. No caso dos geradores a *diesel*, não existe uma grande diferença entre a potência destes componentes para ambos os sistemas. Tal resultado deve-se ao facto de o *HomerPro* dimensionar os geradores tendo em conta a potência máxima de consumo, sendo esta bastante semelhante em ambos os sistemas.

Atendendo ao facto de que é necessário uma maior capacidade instalada dos diferentes componentes do sistema, o sistema energético dimensionado para o consumo base do edifício apresenta um investimento inicial mais elevado. Pela mesma razão se verifica que há um aumento dos custos de operação e de substituição para o sistema dimensionado para o consumo base do edifício.

Quanto aos custos do *diesel*, é possível observar que a diferença destes custos para ambos os sistemas não é tão acentuada como as diferenças descritas anteriormente. Tendo em conta que a capacidade de geradores a *diesel* instalada para ambos os cenários é praticamente a mesma, os níveis de produção destes geradores não serão muito diferentes. Assim sendo, os custos do combustível utilizado por estes geradores não serão muito diferentes de um caso para o outro.

É então possível verificar que as medidas de redução dos consumos energéticos aplicadas ao edifício são economicamente vantajosas para o cliente, permitindo uma poupança de aproximadamente 60 000€ ao fim do tempo de vida útil do sistema energético.

Além das vantagens em termos monetários, as medidas de redução dos consumos energéticos também apresentam vantagens em termos ambientais. Através destas medidas é possível reduzir os níveis de consumo de energia elétrica do edifício. Havendo um menor consumo de energia elétrica, existe uma redução do consumo de combustíveis fósseis, tal como é possível verificar na diferença dos custos do *diesel* para ambos os sistemas estudados nesta secção. A aplicação das medidas de redução dos consumos energéticos resulta assim numa diminuição das emissões de CO₂ em 1 698 kg/ano, o que ao fim do tempo de vida útil do sistema se traduz numa redução de 42.5 toneladas.

6. Conclusão

Após a conclusão da presente dissertação, é possível evidenciar a importância que a fase de projeto de um edifício possui, fase em que são tomadas as decisões em relação às características do edifício com recurso a ferramentas de simulação. Através da utilização do programa *EnergyPlus* foi possível não só analisar o comportamento térmico do edifício, assim como prever os seus consumos de energia elétrica.

Para além da utilização do programa *EnergyPlus* para as finalidades descritas anteriormente, este também desempenhou um papel crucial na redução dos consumos de energia elétrica do edifício. Através da aplicação de ventilação natural no edifício foi possível obter-se uma redução do consumo anual de energia elétrica do edifício de aproximadamente 22 MWh, o que se traduz numa redução de 11% do consumo total de energia elétrica do edifício. Com esta diminuição dos consumos de energia elétrica do edifício, é possível obter um sistema energético de menor dimensão, resultando assim em menores custos para o cliente. Esta medida também contribui para o aumento do conforto dos ocupantes do edifício, visto que a entrada de ar novo permite reduzir a concentração de poluentes no ar no interior do edifício. Após a aplicação desta medida, estimou-se que o edifício em estudo apresentaria um consumo anual de energia elétrica de aproximadamente 184 MWh.

Concluído o presente estudo, pode-se verificar que é possível tornar a adega da Ilha do Pico num edifício autossustentável através da instalação de um sistema energético *off-grid*. Além de se apresentar como uma solução possível, este sistema energético possui menores custos do que a ligação do edifício à rede elétrica nacional, qualquer que seja o critério utilizado no seu dimensionamento. Tal resultado encontra-se relacionado com a aplicação de ventilação natural do edifício, permitindo a instalação de sistemas energéticos com menores dimensões e, consequentemente, menores custos.

Face ao exposto, o cenário economicamente vantajoso para o edifício em estudo é o de um sistema energético renovável utilizado para suprir os consumos base do edifício e a utilização de geradores a *diesel* para os consumos da adega. O sistema economicamente vantajoso para o edifício é composto por geradores a *diesel* (116 kW), painéis solares fotovoltaicos (151.6 kW), baterias de ião-lítio (287 kWh) e inversores (41.5 kW), possuindo um custo total de aproximadamente 604 mil €.

Como trabalho futuro, quando o edifício estiver construído, devem ser feitas medições dos parâmetros interiores do edifício ao longo do ano, para que seja possível uma comparação entre os valores simulados obtidos no presente trabalho e os valores medidos, permitindo também uma validação do modelo de simulação. Quando o edifício estiver construído deve também ser feita uma comparação entre os valores de consumo de energia elétrica simulados e os valores reais, sendo que caso exista uma discrepância acentuada entre ambos, o sistema energético economicamente vantajoso ao edifício pode possuir uma configuração diferente da obtida no presente trabalho.

7. Bibliografia

- [1] «Climate change - driving forces - Statistics Explained». Disponível em: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Climate_change_-_driving_forces. [Acedido a 10 de junho de 2018].
- [2] «Buildings - Energy - European Commission». Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. [Acedido a 10 de junho de 2018].
- [3] «Consumption of energy - Statistics Explained». Disponível em: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Consumption_of_energy. [Acedido a 10 de junho de 2018].
- [4] R. A. Serway, J. W. Jewett, e V. Perroonian, *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 10th ed. 2017.
- [5] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, e D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. 2011.
- [6] «Arquitectologia.org». Disponível em: <http://www.arquitectologia.org/Descs/CliFautl0.htm>. [Acedido a 13 de junho de 2018].
- [7] *Getting Started - EnergyPlus Version 8.7 Documentation*. U.S. Department of Energy. 2016.
- [8] D. B. Crawley *et al.*, «EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program», *Energy and Buildings*, vol. 33, 2001.
- [9] *Input Output Reference - EnergyPlus Version 8.7 Documentation*. U.S. Department of Energy. 2016.
- [10] *Engineering Reference - EnergyPlus Version 8.7 Documentation*. U.S. Department of Energy. 2016.
- [11] R. Siddaiah e R. P. Saini, «A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 376–396, 2016.
- [12] Z. Chmiel e S. C. Bhattacharyya, «Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries», *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 578–588, 2015.

- [13] L. Ali e F. Shahnia, «Determination of an economically-suitable and sustainable standalone power system for an off-grid town in Western Australia», *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 243–254, 2017.
- [14] G. J. Dalton, D. A. Lockington, e T. E. Baldock, «Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel», *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1475–1490, 2008.
- [15] A. F. Silva, M. M. Lerer, L. Reis, e G. C. da Graça, «Integrating Renewable Energy Systems with Contemporary Architecture in a Zero Energy House in Southeastern Brazil». 2015
- [16] *HOMER ® Pro Version 3.7 User Manual*. Homer Energy. 2016.
- [17] «LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia». Disponível em: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>. [Acedido a 5 de janeiro de 2018].
- [18] N. M. Mateus, A. Pinto, e G. C. da Graça, «Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell», *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 511–522, 2014.
- [19] «Como armazenar garrafas de vinho». Disponível em: <https://clubedevinhos.com/artigos/como-armazenar-garrafas-vinho>. [Acedido a 10 de janeiro de 2018].
- [20] ASHRAE, *2001 ASHRAE Handbook Fundamentals, SI edition*. pp. 29.10-29.11. 2001.
- [21] G. C. da Graça, A. Augusto, e M. M. Lerer, «Solar Powered Net Zero Energy Houses for Southern Europe : Feasibility study Solar powered net zero energy houses for southern Europe : Feasibility study», *Solar Energy*, 2012.
- [22] G. C. da Graça, N. R. Martins, e C. S. Horta, «Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall», *Energy and Buildings*, vol. 50, pp. 177–188, 2012.
- [23] Á. J. M. Seco, J. H. G. Gonçalves, e A. H. P. da Costa, «Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes», 2008.

Anexo I – Alçados e cortes do edifício em estudo

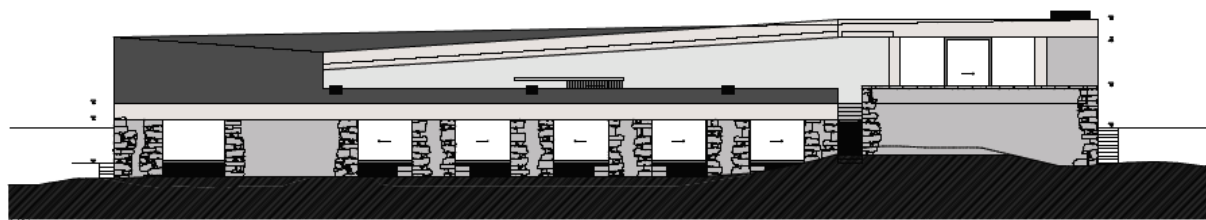


Figura A.1 – Alçado Norte do edifício em estudo.

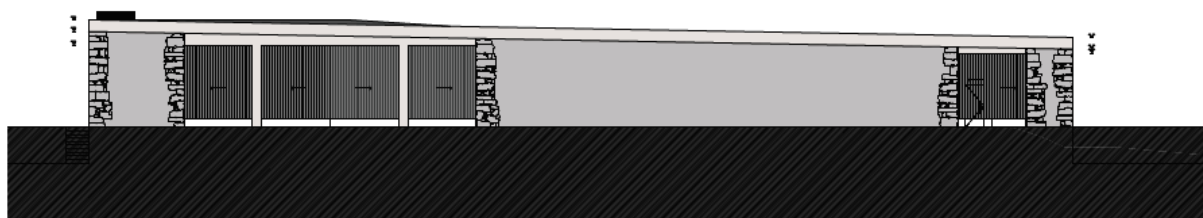


Figura A.2 – Alçado Sul do edifício em estudo.

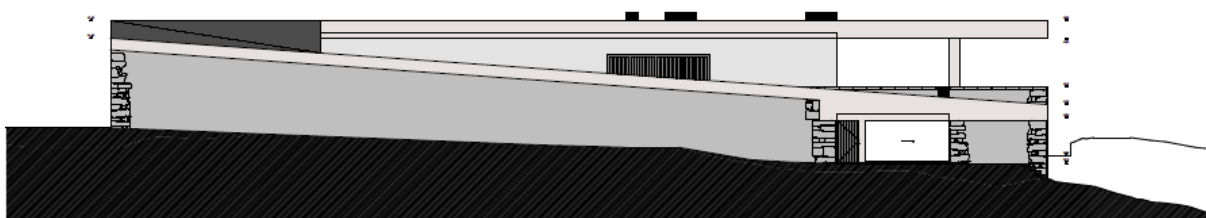


Figura A.3 – Alçado Nascente do edifício em estudo.

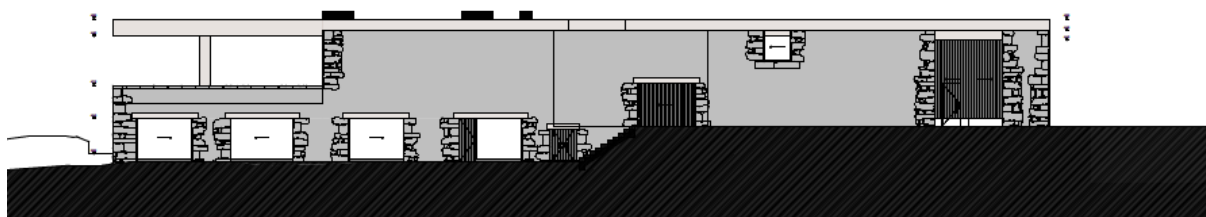


Figura A.4 – Alçado Poente do edifício em estudo.

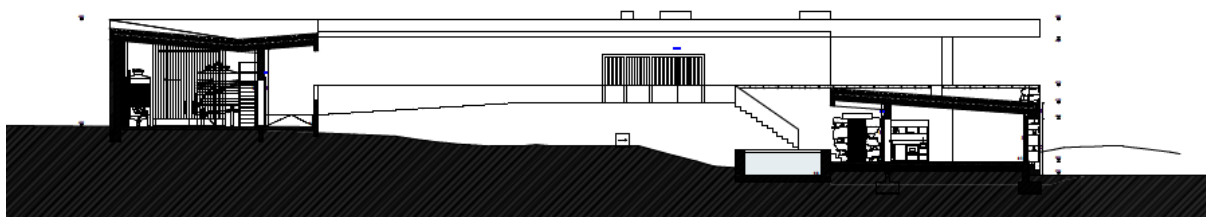


Figura A.5 – Corte número 1 do edifício em estudo.

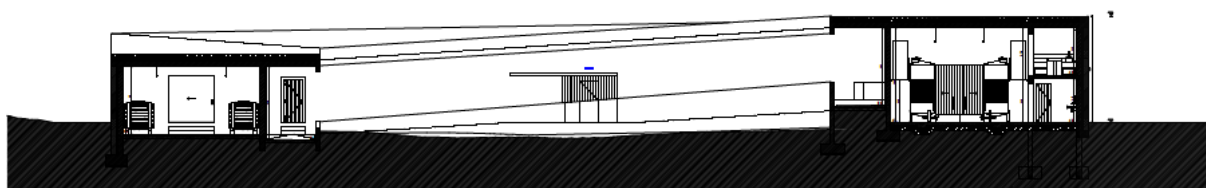


Figura A.6 – Corte número 2 do edifício em estudo.

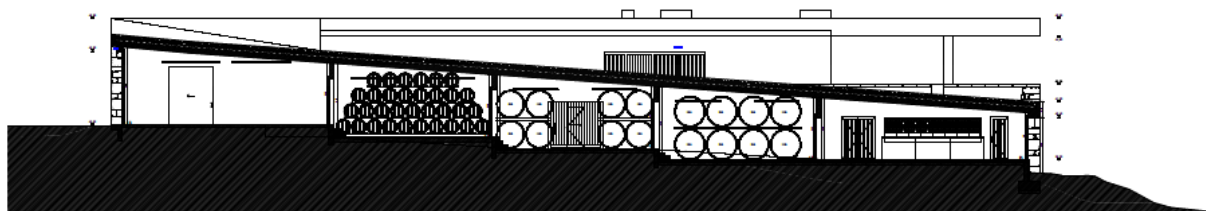


Figura A.7 – Corte número 3 do edifício em estudo.

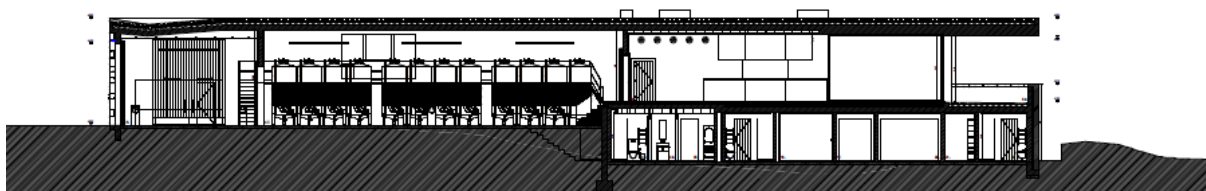


Figura A.8 – Corte número 4 do edifício em estudo.

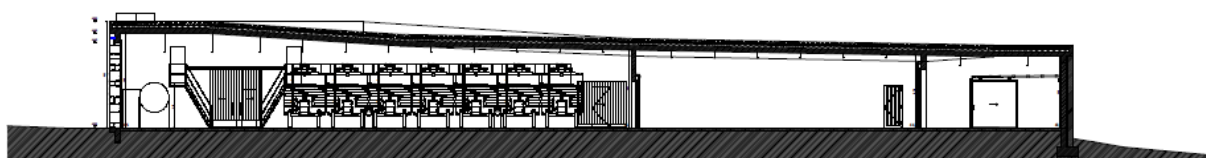


Figura A.9 – Corte número 5 do edifício em estudo.

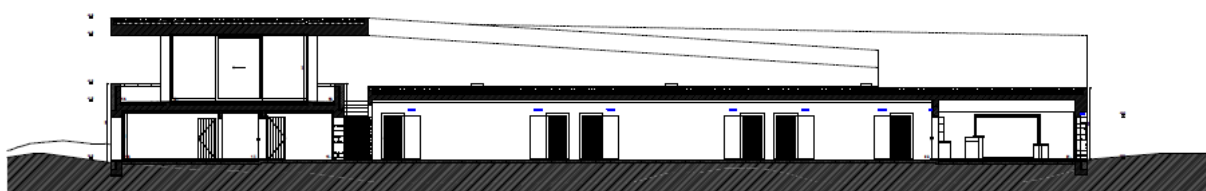


Figura A.10 – Corte número 6 do edifício em estudo.